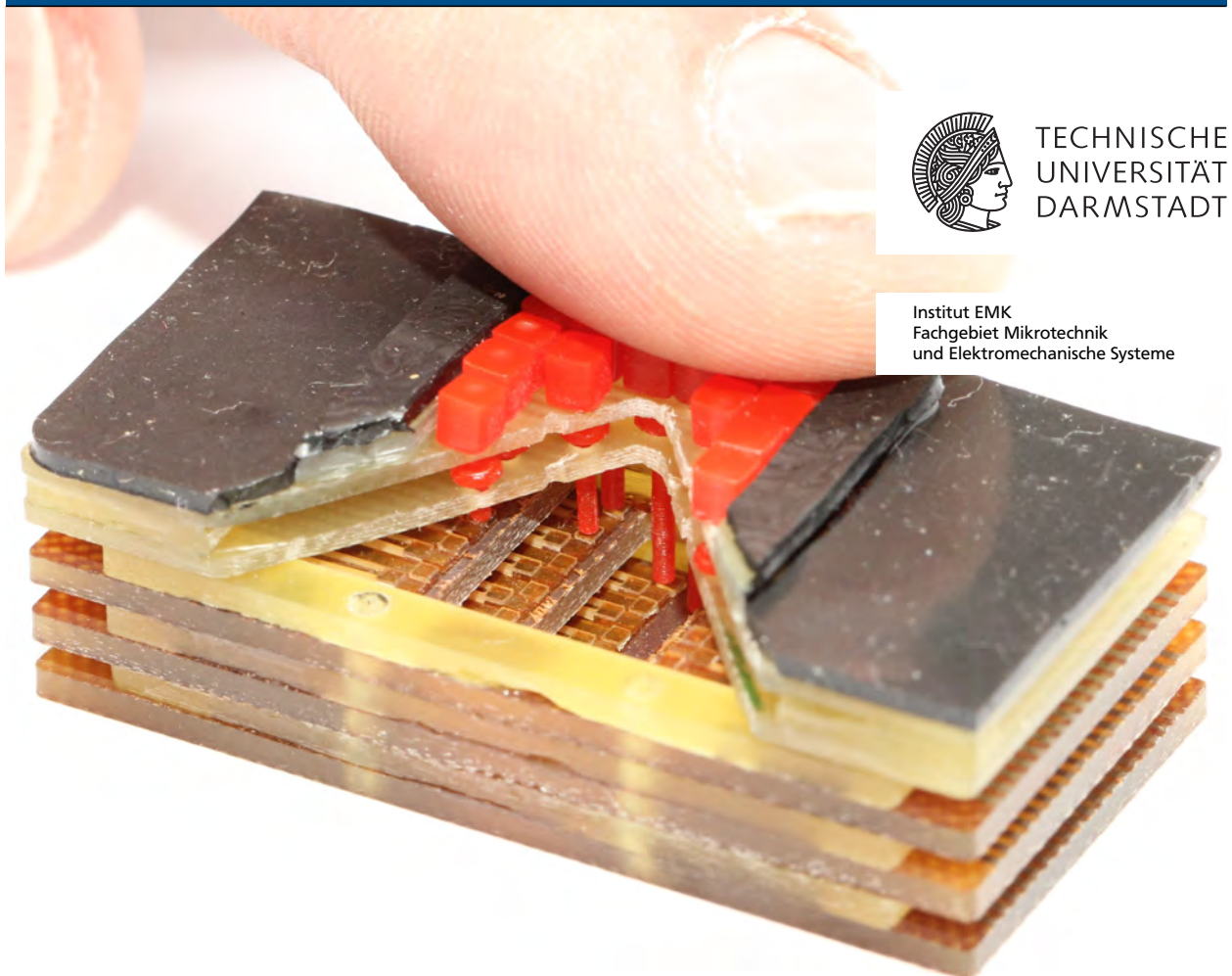


Optimierung der Leistungsfähigkeit elektrothermischer Polymeraktoren aus SU-8 am Beispiel eines haptischen Displays

Optimizing the performance of SU-8 electrothermal actuators on the example of a haptic display

Zur Erlangung des akademischen Grades Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation von Thomas Winterstein aus Aschaffenburg
Tag der Einreichung: 19. April 2016, Tag der Prüfung: 30. August 2016
Darmstadt — D 17

1. Gutachten: Prof. Dr.-Ing. Helmut F. Schlaak
2. Gutachten: Prof. Dr.-Ing. Ulrike Wallrabe



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Institut EMK
Fachgebiet Mikrotechnik
und Elektromechanische Systeme

Optimierung der Leistungsfähigkeit elektrothermischer Polymeraktoren aus SU-8 am Beispiel eines haptischen Displays
Optimizing the performance of SU-8 electrothermal actuators on the example of a haptic display

Genehmigte Dissertation von Thomas Winterstein aus Aschaffenburg

1. Gutachten: Prof. Dr.-Ing. Helmut F. Schlaak
2. Gutachten: Prof. Dr.-Ing. Ulrike Wallrabe

Tag der Einreichung: 19. April 2016

Tag der Prüfung: 30. August 2016

Darmstadt — D 17

Optimierung der Leistungsfähigkeit elektrothermischer Polymeraktoren aus SU-8 am Beispiel eines haptischen Displays

Vom Fachbereich
Elektrotechnik und Informationstechnik
der Technischen Universität Darmstadt
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. Thomas Winterstein

geboren am 12. November 1983
in Aschaffenburg

Referent:
Korreferentin:

Prof. Dr.-Ing. Helmut F. Schlaak
Prof. Dr.-Ing. Ulrike Wallrabe

Tag der Einreichung: 19. April 2016
Tag der mündlichen Prüfung: 30. August 2016

D 17
Darmstadt 2016

Bitte zitieren Sie dieses Dokument als:

URN: urn:nbn:de:tuda-tuprints-57198

URL: <http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/5719/>

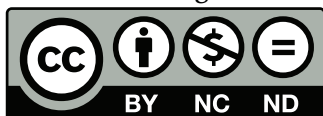
Dieses Dokument wird bereitgestellt von tuprints, E-Publishing-Service der TU-Darmstadt

<http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de>

tuprints@ulb.tu-darmstadt.de

Die Veröffentlichung steht unter folgender Creative Commons Lizenz:

Namensnennung-Keine kommerzielle Nutzung-Keine Bearbeitung 4.0 International



<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Erklärung zur Dissertation

Hiermit versichere ich, die vorliegende Dissertation ohne Hilfe Dritter nur mit den angegebenen Quellen und Hilfsmitteln angefertigt zu haben. Alle Stellen, die aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht. Diese Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Darmstadt, den 19. April 2016

(Thomas Winterstein)



Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand in meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Elektromechanische Konstruktionen der Technischen Universität Darmstadt.

Ich bedanke mich bei meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Helmut F. Schlaak, der mir die Gelegenheit gab, auf dem spannenden und vielseitigen Gebiet der Mikrosystem- und Feinwerktechnik zu arbeiten, mir sehr großen Freiraum bei der Umsetzung gewährte und mich durch seine Diskussionsbereitschaft stets unterstützte.

Prof. Dr.-Ing. Ulrike Wallrabe danke ich für das meiner Arbeit entgegengebrachte Interesse und die Übernahme des Korreferats.

Allen Kolleginnen und Kollegen des Instituts EMK möchte ich für ihre Unterstützung, ihre Freundlichkeit und ihre Offenheit danken. Das damit verbundene sehr angenehme, kreative und kooperative Arbeitsklima hat über manche Durststrecke hinweggeholfen. Besonderer Dank gilt Bernhard Jochem, der für alle Fragen in- und außerhalb des Institutsbetriebs stets ein offenes Ohr hatte, und das Reinraumlabor für Mikrotechnik immer in funktionstüchtigem Zustand hielt. Ebenso danke ich allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der feinmechanischen Werkstatt für die hervorragende Fertigung und die wertvollen Ratschläge im Bereich der mechanischen Konstruktion.

Auch den Unterstützern meiner Forschungstätigkeit möchte ich Dank aussprechen. Dazu zählen zunächst alle Studierenden, die in Form von Bachelor-, und Masterarbeiten, internationalen Austauschprogrammen, Projektseminaren und Hiwistunden zu meiner Forschung beigetragen haben. Prof. Dr. Jürgen Vogel von der Westsächsischen Hochschule Zwickau war mir durch die zahlreichen Messungen und die erkenntnisreichen abendlichen Telefonate eine große Hilfe. Meinen Projektpartnern der Forschungsgesellschaft für Gerontologie e.V. an der TU Dortmund danke ich für die Einblicke in die geisteswissenschaftliche Fakultät und das große Engagement bei den Nutzerbefragungen im Rahmen unseres gemeinsamen Forschungsvorhabens.

Zu guter Letzt gilt ganz besonderer Dank meinem Bruder Andreas für seine Unterstützung und meiner Partnerin Carolin für ihre stete Zuversicht und ihre Geduld.

Darmstadt im April 2016

Thomas Winterstein



Zusammenfassung

Die Untersuchung der Betriebsgrenzen und die Optimierung der Leistungsfähigkeit miniaturisierter elektrothermischer Polymeraktoren sind Gegenstand der vorliegenden Arbeit. Diese Aktorklasse definiert sich durch die Nutzung der thermischen Ausdehnung von eingespannten mikrostrukturierten Stäben oder Platten. Durch lokale Erzeugung Joule'scher Wärme wird die Aktorgeometrie definiert ausgedehnt und eine gerichtete Bewegung erzeugt.

Die Analyse des Stands der Technik umfasst 115 Publikationen und gibt eine Übersicht über miniaturisierte elektrothermische Aktoren. Zunächst werden die häufigsten Grundgeometrien diskutiert und auf Applikationen und Kenndaten der Aktoren eingegangen. Die Aktoren nehmen aktive Flächen von $118 \mu\text{m}^2$ bis 825 mm^2 ein, erreichen Auslenkungen zwischen 35 nm und $621 \mu\text{m}$ und Kräfte von $2,8 \mu\text{N}$ bis 40 mN . Die Leistungsaufnahme liegt zwischen $0,5 \text{ mW}$ und 6 W . Elektrothermische Polymeraktoren sind mit 14% im Stand der Technik vertreten. Als Material kommt überwiegend der UV-Negativresist SU-8 zum Einsatz, der die kostengünstige Fertigung großer, mechanisch stabiler Aktoren mit hohen Kräften ermöglicht. Gerade im Hinblick auf eine Interaktion mit der Umwelt ist dies erforderlich. Aus der Übersicht der Polymeraktoren leiten sich die Forschungsfragen ab: Die thermische und mechanische Stabilität der Werkstoffe SU-8 (Dehnungskörper) und galvanisch abgeschiedenes Nickel (Heizer) soll untersucht und optimiert werden. Weiterhin soll die Temperaturverteilung in den geheizten Bereichen der Aktorgeometrie homogenisiert werden, um die Leistungsfähigkeit der Aktoren zu erhöhen.

Eine Übersicht der notwendigen Fertigungstechnologien zeigt den Gestaltungsspielraum der Aktorauslegung auf. Die im Rahmen der Arbeit durchgeführte Prozessentwicklung eröffnet weitere Möglichkeiten. Die bestehenden Lithographieprozesse für Galvanoformen mit einer Strukturweite von $50 \mu\text{m}$ auf rauen Substraten werden hin zu $20 \mu\text{m}$ optimiert. Weiterhin wird ein Sprühbelackungsprozess etabliert, mit dem sich große freistehende Topologien bis zu $300 \mu\text{m}$ Höhe konform mit $7...30 \mu\text{m}$ Lack beschichten lassen. Außerdem werden Substrate im Anschluss an die mikrotechnische Fertigung erfolgreich durch Mikrofräsen strukturiert. So können Leiterplattenkomponenten mit Mikrosystemen im Batch gefertigt werden.

Die Konstruktionsmaterialien der Mikroaktoren, SU-8 und galvanisch abgeschiedenes Nickel, werden im Hinblick auf ihre Einsatzgrenzen untersucht. Die Eigenschaften von beiden Werkstoffen sind abhängig von den Herstellungsparametern.

Für SU-8 werden der Vernetzungsgrad, die Glasstemperatur und die intrinsischen Spannungen bestimmt. In der Untersuchung des Vernetzungsgrade mittels Infrarotspektrometrie erweisen sich die Maximaltemperaturen von Post- und Hardbake als kritische Parameter, die so hoch wie möglich zu wählen sind. Die Glasstemperatur und das Temperaturverhalten des Elastizitätsmoduls werden mittels Dynamisch-Mechanischer Analyse (DMA) untersucht. Unterschiede in der Postbaketemperatur beeinflussen die Glasstemperatur auch nach dem Hardbake. Zu Gunsten der Strukturauflösung wird der Postbake auf 95°C festgelegt, der Hardbake darf wegen des gewählten Substratmaterials FR-4 180°C nicht überschreiten. Daraus folgt eine Glasstemperatur von ca. 135°C und eine Betriebsgrenze der Mikroaktoren von 120°C .

Intrinsische Schichtspannungen werden mit Hilfe von Zeigerteststrukturen untersucht. Es ergeben sich Spannungsbeträge von $3...11 \text{ MPa}$. Durch sequentielles Fertigen von zwei SU-8-Schichten mit unterschiedlichen Parametern lassen sich Spannungsgradienten und damit vorgespannte Strukturen erzeugen.

Für galvanisch aus einem Sulfamatbad abgeschiedenes Nickel als Heizermaterial sind die mechanischen und elektrischen Eigenschaften wichtig. Die Parameter Temperatur, Stromdichte, Pulse-Plating-Frequenz, Puls-Pause-Verhältnis, Kathodenanströmung und -rotation beeinflussen

die Schichtbeschaffenheit während der Herstellung. Die mechanischen Eigenschaften E-Modul (150 GPa), Zugfestigkeit (540 MPa) und intrinsische Spannungen (≤ 20 MPa) sind im Stand der Technik bereits untersucht und werden anhand einer Literaturrecherche aufgearbeitet. Die Charakterisierung des spezifischen Widerstands erfolgt durch eigene Versuche mit Hilfe eines statistischen Versuchsplans. Es ergeben sich Mittelwerte von $0,065 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$ bis $0,078 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$, was in der Größenordnung von Bulk-Material liegt. Auswirkungen haben vor allem die Parameter Stromdichte, Pulse-Plating und Substratmaterial. Der Temperaturkoeffizient wird aus der Bestromung einer metallischen Streifenprobe bestimmt und ergibt sich zu $5,93 \cdot 10^{-3} \text{K}^{-1}$.

Für die Optimierung der Aktoren ist eine gezielte Beeinflussung des Temperaturfelds durch die Heizergeometrie nötig. Hierfür wird ein neues gekoppeltes FEM-Modell erarbeitet, das erstmals Substrat, Luftspalte, Dehnungskörper und vor allem den Heizer als Volumenkörper berücksichtigt. Die Parametrisierung erfolgt über das in den vorigen Kapiteln bestimmte Materialverhalten und eigene Versuche zum Konvektionskoeffizienten ($40 \text{ W m}^{-2} \text{K}^{-1}$). Das Modell wird an einem vermessenen Aktor validiert und eine Genauigkeit aller Domänen von $\pm 4\%$ erreicht. Das Modell ermöglicht ein neuartiges Optimierungsverfahren für die Mikroaktoren: Die thermische Leitfähigkeit eines zu heizenden Dehnungskörpers wird analysiert. Daraus leitet sich die lokal nötige Leistungsabgabe des Heizers und damit ein geometrieangepasster Heizer ab. Damit stellt sich auf möglichst weiten Bereichen des heißen Balkens die Maximaltemperatur ein. Die Methode wird am Beispiel eines Referenzaktors mit einem aktiven Volumen von $4 \times 1 \times 0,3 \text{ mm}^3$ vorgestellt und angewendet. Es wird eine Blockierkraft von 43,7 mN und eine Leerlaufauslenkung von $56,9 \mu\text{m}$ erreicht. Die simulierte Leistungssteigerung beträgt damit 17 %.

Das Verhalten der Aktoren mit verbesserten Materialien und optimiertem Heizer wird in statischen, dynamischen und Langzeituntersuchungen bestimmt. Auslenkung und Temperatur sind proportional zur Steuerleistung, in den ersten Aktorzyklen tritt jedoch eine remanente Nulllagenverschiebung entgegen der Betriebsrichtung von 25 % des Aktorhubs auf. Bei einer Steuerleistung von 150 mW stellen sich eine maximale Temperatur von 120°C und eine Auslenkung von $50 \mu\text{m}$ ein. Im Dauertest sinkt die erreichbare Anzahl Aktorzyklen mit ansteigender Steuerleistung: Bei 150 mW werden >45.000 Zyklen, bei 315 mW noch ca. 900 Zyklen erreicht. Ausfallgrund ist der Ermüdungsbruch des Heizers. Die Leistung von ca. 350 mW führt zur thermischen Zerstörung (ca. 200°C) der Aktoren. Die Ansprechzeit der Aktoren bei 150 mW ergibt sich bei Stromspeisung zu 1,9 s, bei Spannungsspeisung werden 1,4 s erreicht. Der Grund hierfür ist die träge Erwärmung des Heizers. Der Vergleich von Referenzaktor und optimiertem Design ergibt eine Steigerung der Auslenkung von 20...30 %.

Im letzten Teil der Arbeit wird eine neuartige Applikation für elektrothermische Polymeraktoren behandelt: Ein haptisches Display, bestehend aus einem Array taktiler Bildpunkte (Taxel), wird in die Taste einer Fernsehfernbedienung integriert. Jedes Taxel lässt sich um eine feste Höhenstufe aus der Tastenfläche anheben, um dem Benutzer haptische Icons darzustellen. Mit Hilfe der Staircase-Methode mit festen Stimuli wird die Zweipunktschwelle von Senioren ermittelt. Daraus folgt ein Taxelabstand von 2,5 mm, eine Taxelhöhe von 0,5 mm und die quadratische Grundform zur Darstellung geschlossener Linienzüge und deutlicher Abstände. Ein neuartiger Antrieb, basierend auf einer mechanisch bistabilen Verriegelung mit je einem elektrothermischen In-Plane- und Out-of-Plane-Aktor, wird vorgestellt, aufgebaut und charakterisiert. Mit einem Leistungsbedarf von 110 mW (In-Plane) und 290 mW (Out-of-Plane) wird ein Hub von 0,6 mm und eine Schaltzeit von 5,2 s erreicht. Die Schaltenergie beträgt 1,26 Js. Damit ist die prinzipielle Machbarkeit der Applikation und des technischen Ansatzes gezeigt. Die erzielten Ergebnisse sind Vorarbeiten für andere Einsatzszenarien, wie großflächige haptische Displays oder adaptive Kiosksysteme.

Abstract

The examination of the operating limits and an optimization of miniaturized electro-thermal polymer actuators are subject of this thesis. This type of actuator is defined by applying local Joule heating to micro structured cantilevers or plates. Precise thermal expansion results in directional movement.

The analysis of the state of the art covers 115 publications and provides a survey of miniaturized electrothermal actuators in general. The most common designs are discussed as well as applications and performance characteristics. The actuators take up an area of $118 \mu\text{m}^2$ to 825mm^2 , reach deflections of 35 nm to 621 μm and blocking forces of 2,8 μN to 40 mN. The power consumption is between 0,5 mW and 6 W. Polymer electrothermal actuators make 14 % of the state of the art. The main constructional material is the UV negative photoresist SU-8, which allows cost-efficient fabrication of large, mechanically stable devices with large output forces. Regarding miniaturized actuators interacting with the surrounding environment, relatively large dimensions are necessary. The overview of polymer actuators leads to the research questions: The thermal and mechanical stability of SU-8 (expansion body) and electroplated nickel (heater) need to be examined and optimized for actuator use. Furthermore, the temperature distribution of the heated geometry can be homogenized to improve the overall actuator performance.

An overview of the fabrication technologies at hand shows the technical capabilities. Further process development improves the possibilities: The existing lithography steps for electroforming molds, which provide a feature size of 50 μm on rough substrates, are optimized up to 20 μm . Furthermore, a spray process is established for conformal coating of structures up to 300 μm in height with 7...30 μm photoresist. Finally, substrates carrying micro systems are structured successfully by micro-milling. This allows to batch fabricate complex PCB-components with micro systems.

The construction materials of the electrothermal actuators, SU-8 and electroplated nickel, are examined regarding their operating limits. The material properties prove to be dependent on the process parameters.

The degree of cross-linking, the glass transition temperature and intrinsic layer stress are determined for SU-8. The degree of cross-linking is examined using infrared spectroscopy. The maximum temperatures of post- and hardbake prove to be the critical parameters and need to be chosen as high as possible. The glass transition temperature and the temperature dependence of the Young's modulus are measured using a dynamic-mechanical analysis. An influence of the postbake temperature on the glass temperature is apparent even after hardbake. To keep a good structural resolution, the postbake temperature is chosen to 95 °C, the hardbake temperature is limited to 180 °C by the PCB substrate made of FR-4. This results in a glass temperature of about 135 °C and an maximum actuator temperature of 120 °C.

Intrinsic layer stress is determined using indicator structures. Again depending on the process temperature, stress of 3...11 MPa is achieved. By sequential fabrication of two SU-8 layers, gradients of layer stress can be obtained, allowing normally latched structures.

Electroplated nickel from a sulphamate bath is examined regarding its mechanical and electrical properties. The parameters temperature, current density, pulse-plating frequency, pulse-break ratio, electrolyte flow and cathode rotation influence the layer quality. The mechanical properties Young's modulus (150 GPa), breaking stress (540 MPa) and intrinsic layer stress (≤ 20 MPa) are already examined and provided by literature research. The characterization of the resistivity is

done using design of experiments. Average values of $0,065 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$ to $0,078 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$ are achieved, which are in the range of bulk material. The main influencing factors are current density, pulse-plating and substrate material. The temperature coefficient is determined by Joule heating a conducting path and result in $5,93 \cdot 10^{-3}\text{K}^{-1}$.

To optimize the actuators, a defined and homogeneous temperature field is to be achieved along the heated geometry. Therefore, a new coupled FEM model is designed, which features the full actuator geometry containing substrate, air gaps, expansion body and the heater. Parametrization is done by applying the material properties discussed in the previous sections and the experimental determination of the convection coefficient ($40 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$). The model is validated using a characterized micro actuator leading to an accuracy of $\pm 4\%$ for all domains. The model allows a novel optimization approach: First, the course of the thermal conductivity along the expansion body is determined. This provides the necessary local power output of the heater and leads to a geometry-specific heater design. Thus, the maximum temperature of the actuator is reached at wide areas along the heated beam. This method is applied to a reference actuator with an active space of $4 \times 1 \times 0,3 \text{ mm}^3$. A blocking force of $43,7 \text{ mN}$ and a deflection of $56,9 \mu\text{m}$ are reached. This equals an improved performance by 17% .

The actuators with improved materials and optimized heater are characterized by static, dynamic and long term tests. Deflection and temperature are proportional to the driving power, a permanent offset drift of 25% of the deflection occurs during the first actuation cycles. A driving power of 150 mW leads to a maximum temperature of 120°C and a deflection of $50 \mu\text{m}$. During long term testing the maximum number of cycles decreases with the driving power: >45.000 cycles are achieved at 150 mW and reduce to 900 cycles at 315 mW . This is caused by fatigue failure of the metallic heater. Thermal degradation (about 200°C) is reached at 350 mW . The rise time of the actuators at 150 mW is $1,9 \text{ s}$ if driven by a current, voltage supply lead to $1,4 \text{ s}$. The relatively slow heat-up of the nickel structures lead to this notable difference. An experimental comparison of the reference actuator to the optimized design shows an improved deflection of $20\ldots 30\%$.

The last part of this thesis focuses on a novel application for electrothermal polymer actuators: A haptic display, an array of tactile pixels (taxels), is integrated in the button of a remote control. Each taxel can be raised out of the button surface by one fixed step to provide a haptic icon to the user. The two-point threshold of elderly people is required as a design rule and is determined by a user test applying a staircase procedure. It results in a distance ($2,5 \text{ mm}$), a height ($0,5 \text{ mm}$) and the shape (quadratic) of the taxels. The latter allows creating closed lines as well as tangible gaps. A novel drive consisting of a bistable locking mechanism with in-plane and out-of-plane actuators is presented, fabricated and characterized. Driving powers of 110 mW (in-plane) and 290 mW (out-of-plane) lead to a stroke of $0,6 \text{ mm}$ and a total switching time of $5,2 \text{ s}$. The switching energy amounts to $1,26 \text{ Ws}$. This proves the feasibility of the application and the technical approach. The results serve as preliminary work for further operational scenarios such as large area Braille displays or adaptive computer terminals.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
1.1. Motivation der Arbeit	2
1.2. Gliederung der Arbeit	3
2. Stand der Technik elektrothermischer Mikroaktoren	5
2.1. Elektrothermische Mikroaktoren im Überblick	6
2.1.1. Grundformen	6
2.1.2. Grundsätzliches Aktorverhalten	7
2.1.3. Vergleich der Leistungsdaten	8
2.2. Applikationen	8
2.3. Polymere elektrothermische Mikroaktoren aus SU-8	11
2.4. Ableiten des Forschungsbedarfs	14
3. Technologische Randbedingungen und Prozessentwicklung	17
3.1. Basistechnologien	17
3.1.1. Alternative Substratmaterialien	18
3.1.2. UV-Tiefenlithographie	19
3.1.3. Mikrogalvanoformung	23
3.2. Elektromechanische und thermische Messtechnik	25
3.2.1. Statische und dynamische In-Plane-Messung mittels Motion-Analyzer	26
3.2.2. Statische Out-of-Plane-Messung	28
3.2.3. Temperaturmessung mittels Thermographie	28
3.3. Optimierung vorhandener Prozesse	29
3.3.1. Galvanisch abgeformte Leiterbahnen mit 20 µm Breite	30
3.3.2. Dünnschicht-Leiterbahnen mit 20 µm Breite	31
3.3.3. Belacken von Substraten mit hoher Oberflächentopologie	32
3.3.4. Mehrlagige SU-8-Strukturen durch Laminieren von SUEX	33
3.3.5. Substratstrukturierung durch Fräsen	34
4. Einsatzgrenzen von SU-8 für elektrothermische Mikroaktoren	37
4.1. Grundlagen zu SU-8	37
4.1.1. Zusammensetzung	37
4.1.2. Eigenschaften von SU-8	38
4.2. Prozessparameter von SU-8	39
4.2.1. Softbake	40
4.2.2. Belichtung und Postbake	41
4.2.3. Hardbake	42
4.2.4. Parametersätze für die experimentelle Untersuchung von SU-8	43
4.3. Untersuchung des Vernetzungsgrades	43
4.3.1. Messmethode: Fourier-Transformations-Infrarotspektrometrie (FT-IR)	43
4.3.2. Probenfertigung und Versuchsdurchführung	43
4.3.3. Diskussion der Ergebnisse	44
4.3.4. Fazit	45
4.4. Untersuchung der Glasstemperatur	45
4.4.1. Bestimmung der Glasstemperatur mittels DMA	45
4.4.2. Probenfertigung und Versuchsdurchführung	46

4.4.3.	Diskussion der Ergebnisse	47
4.4.4.	Fazit	50
4.5.	Untersuchung der intrinsischen Schichtspannungen	50
4.5.1.	Bestimmung der Spannungen durch Zeiger-Teststrukturen	50
4.5.2.	Auslegung und Fertigung der Teststrukturen	51
4.5.3.	Diskussion der Ergebnisse	53
4.5.4.	Intrinsisch vorgespannte Strukturen	53
4.6.	Zusammenfassung: Prozessparameter und Materialeigenschaften	55
5.	Galvanisch abgeschiedenes Nickel als Werkstoff für mikrostrukturierte Heizelemente	57
5.1.	Elastizitätsmodul	57
5.2.	Zugfestigkeit	58
5.3.	Intrinsische Spannungen	58
5.4.	Spezifischer Widerstand	60
5.4.1.	Aufbau des Messplatzes und Auslegung der Proben	61
5.4.2.	Statistischer Versuchsplan	62
5.4.3.	Auswertung der Versuche	63
5.5.	Temperaturkoeffizient des spezifischen Widerstands	65
5.6.	Zusammenfassung: Materialeigenschaften	66
6.	Modellierung und Entwurf optimierter elektrothermischer Mikroaktoren	67
6.1.	Elektrothermisch-mechanisch gekoppeltes FEM-Modell	68
6.1.1.	Ansatz der Simulation	68
6.1.2.	Modellierung der Festkörper	73
6.1.3.	Thermische Modellierung	74
6.1.4.	Verifikation des elektrothermisch-mechanisch gekoppelten FEM-Modells	79
6.2.	Optimierung der Mikroaktoren durch Homogenisierung der Betriebstemperatur	80
6.2.1.	Lokale thermische Leitfähigkeit des geheizten Balkens	80
6.2.2.	Heizermuster	82
6.2.3.	Auslegung des optimierten Heizers und Vergleich mit der Referenzgeometrie	84
6.2.4.	Vereinfachung des Simulationsansatzes zum Aktorentwurf	86
7.	Messtechnische Charakterisierung und Betriebsgrenzen der Mikroaktoren	89
7.1.	Herstellungsprozess der Mikroaktoren	89
7.2.	Charakterisierte Aktorvarianten	90
7.3.	Charakterisierung des statischen Verhaltens	90
7.3.1.	Grundsätzliches Aktorverhalten	91
7.3.2.	Vergleich der Aktordesigns	92
7.4.	Charakterisierung des dynamischen Verhaltens	94
7.5.	Charakterisierung des Langzeitverhaltens	97
7.5.1.	Verhalten im Dauerbetrieb	97
7.5.2.	Lebensdauer	99
7.6.	Aktorschädigung und -ausfall	100
7.6.1.	Alterung von SU-8	100
7.6.2.	Ermüdung von galvanischem Nickel	102
7.6.3.	Interpretation des Aktorverhaltens	102
7.7.	Betriebsgrenzen der Mikroaktoren	103

8. Entwicklung eines haptischen Displays zur statischen Informationsdarstellung	105
8.1. Tragbare haptische Bedienelemente für den demographischen Wandel	105
8.1.1. Mobile haptische Bedienelemente	105
8.1.2. Stand der Technik für mobile Eingabegeräte	106
8.1.3. Forschungsbedarf für adaptive haptische Informationsdarstellung	108
8.2. Ableitung der Anforderungen an das haptische Display	108
8.2.1. Probandentest zur Quantifizierung der haptischen Wahrnehmung	109
8.2.2. Sonstige Anforderungen	114
8.3. Mechanisch bistabiles Antriebsarray mit elektrothermischen Mikroaktoren	115
8.3.1. Mechanisch bistabile Verriegelung	116
8.3.2. Entwurf der elektrothermischen Mikroaktoren	117
8.3.3. Anordnung der Antriebe im Array	119
8.4. Entwurf des Gesamtsystems	121
8.5. Fertigung des haptischen Displays	123
8.5.1. Mikrotechnische Fertigung des Antriebsarrays	123
8.5.2. Feinwerktechnischer Aufbau und Montage	126
8.6. Charakterisierung des haptischen Displays	127
8.6.1. In-Plane Aktor	127
8.6.2. Out-of-Plane Aktor	128
8.6.3. Schaltvorgang	130
8.7. Rezeption der taktilen Informationsdarstellung und der adaptiven Fernbedienung .	131
8.7.1. Konzeption des zweiten Nutzertests	131
8.7.2. Ergebnis der simulierten Gerätebedienung	134
8.7.3. Designrichtlinien für die Fernbedienung	135
8.8. Fazit	136
8.8.1. Haptisches Display mit integrierten Antrieben	136
8.8.2. Adaptive Fernbedienung	137
9. Zusammenfassung und Ausblick	139
9.1. Zusammenfassung der Ergebnisse	139
9.2. Ausblick	140
9.2.1. Weiterführung der vorliegenden Arbeit	140
9.2.2. Weitere Forschungsfragen: Alternative Aktormaterialien	142
9.2.3. Neue Applikationen	142
Literaturverzeichnis	147
A. Ergänzungen zu den Fertigungstechnologien am Institut EMK	163
B. Physikalischen Grundlagen der elektro-thermo-mechanischen Wandlung	171
C. Leistungsbereiche optimierter elektrothermischer Mikroaktoren	175
D. Lithographiemasken	181



1 Einleitung

Im Jahre 1962 beschreiben *Tufte et. al.* erstmals den Einsatz von Siliziumplatten mit eindotierten piezoresistiven Widerständen als mechanische Verformungskörper [1] zur Erfassung von Druckänderungen. Damit gehen sie den Schritt von der Mikroelektronik hin zur Mikrosystemtechnik. Diese verbindet miniaturisierte Funktions- und Formelemente aus Mikromechanik, Mikrofluidik oder Mikrooptik mit integrierter Elektronik zu Mikro-Elektro-Mechanischen Systemen (MEMS) mit komplexen Funktionen. Neben der Funktionsintegration steht die Miniaturisierung der Systeme im Mittelpunkt, um bei paralleler Fertigung im Waferverbund große Stückzahlen zu erreichen und die hohen Prozesskosten zu kompensieren.

Die Marktprognose von *Yole Développement*, dargestellt in Abbildung 1.1, zeigt den derzeitigen und erwarteten Umsatz der MEMS-Branche bis ins Jahr 2019, gegliedert nach Applikationen [2]. Von wenigen aktuierten Systemen wie dem InkJet-Druckkopf abgesehen dominieren sensorische Anwendungen den Markt.

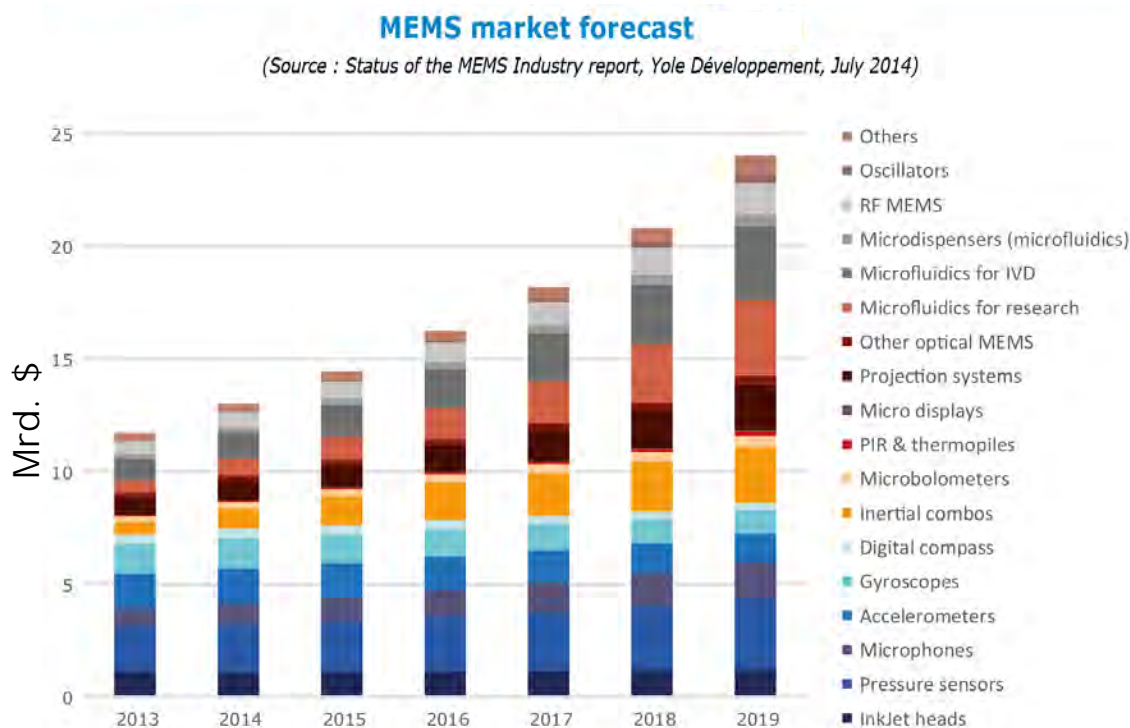


Abbildung 1.1.: Marktprognose für die MEMS-Branche bis ins Jahr 2019 nach [2]

Der Hauptgrund hierfür liegt in der guten Miniaturisierbarkeit, die nur durch die fertigbaren Strukturabmessungen und die Detektierbarkeit der Sensoreffekte begrenzt ist. Durch hochreine Umgebung während der Fertigung und robustes Packaging für den späteren Einsatz sind die Systeme vor Umwelteinflüssen geschützt.

Mikroaktoren sind dagegen nicht unbegrenzt miniaturisierbar, da die minimalen Strukturgrößen von den erforderlichen Kräften und Wegen bestimmt werden. Es lassen sich zwei Wege erkennen:

Auf der einen Seite werden miniaturisierte Systeme durch strukturintegrierte aktive Elemente in ihrer Funktion erweitert. Der Aktor ist dann nicht mehr als eigenständige Baugruppe erkennbar.

Beispiele hierfür sind elektrostatisch angeregte Drehratensensoren [3] oder abstimmbare Linsen [4]. Diese Antriebe interagieren nicht mit der Makrowelt.

Auf der anderen Seite kann die weitere Miniaturisierung feinwerktechnischer Antriebe erfolgen. Diese meist elektrodynamischen Antriebe weisen Baugrößen im einstelligen mm-Bereich auf [5]. Die Fertigungstechnologien der Mikrosystemtechnik machen hier kleinere, höher aufgelöste Strukturen möglich. Ebenso bieten sich alternative Aktorprinzipien, bspw. das elektromagnetische, das piezoelektrische oder das thermomechanische Prinzip an. Die Antriebe in diesem Zwischenbereich lassen sich als integriertes aktives Element eines komplexeren Mikrosystems oder als eigene Baugruppe zur Interaktion mit der Makrowelt einsetzen. Kräfte der Makrowelt lassen sich am Beispiel der menschlichen Hand illustrieren: Die Wahrnehmungsschwelle für Kräfte liegt bei 3 mN [6], beim explorativen Betasten von Gegenständen treten bis zu 100 mN auf [7]. Strukturen im Mikrometerbereich sind diesen Kräften nicht gewachsen, Abmessungen von einigen mm werden nötig. Dies wirft die Frage der Rentabilität klassischer siliziumbasierter Mikrotechnik auf und führt zur Suche nach kostengünstigeren Technologien und Werkstoffen.

Hier setzt die Forschung der polymeren elektrothermischen Mikroaktorik am Institut EMK an. Polymere Stabwerke werden durch mäandrierte planare Leiterschleifen lokal geheizt und die definierte thermische Dehnung über Festkörpergetriebe in Aktorbewegungen umgeformt. Als Konstruktionswerkstoff kommen verschiedene Kunststoffe, vornehmlich der photostrukturierbare Duroplast SU-8 zum Einsatz. Mit Abmessungen von 4...10 mm² sind Auslenkungen bis 300 µm und Kräfte bis 100 mN möglich. Abbildung 1.2 zeigt in vorangegangenen Arbeiten realisierte Systeme: Mikrostrukturierte Schrittantriebe [8], Irisfilter für Hohlwellenleiter [9] und bistabile Mikrorelais [10].

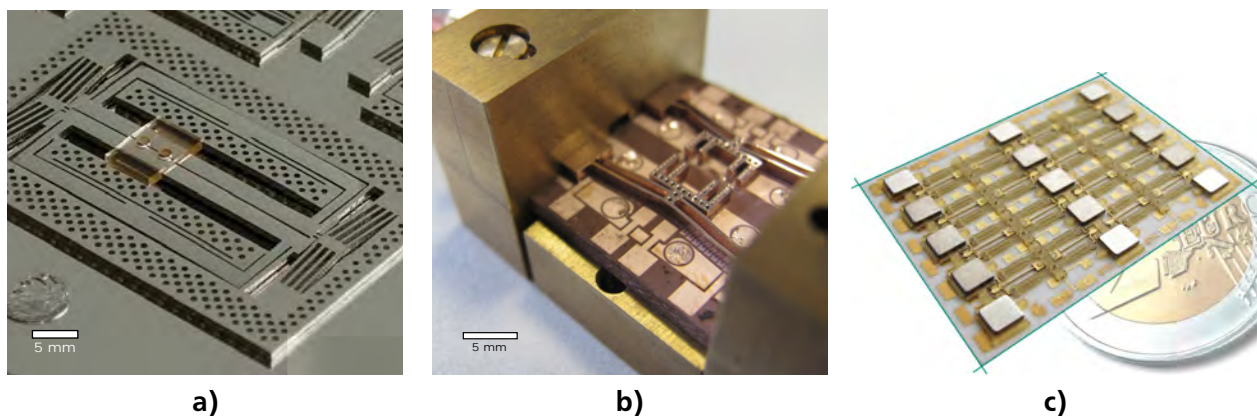


Abbildung 1.2.: Am Institut EMK realisierte elektrothermisch aktuierte Mikrosysteme: a) Miniaturisierte Inchwormplattform nach *Eicher* [8]; b) Irisfilter für Hohlwellenleiter nach *Kohlstedt* [9]; c) Bistabile Mikrorelaismatrix nach *Staab* [10]

1.1 Motivation der Arbeit

Die vorangegangenen Arbeiten haben die Modellierung, die Fertigung und den Einsatz der Mikroaktoren mit Fokus auf das jeweilige Mikrosystem untersucht. Dabei werden gerade im Dauerbetrieb der Aktoren Veränderungen des Verhaltens bishin zum frühen Ausfall beobachtet. Der Grund wird in der zyklischen thermomechanischen Belastung der Werkstoffe gesehen. Besonders für SU-8 ist bekannt, dass sich die Materialeigenschaften abhängig von der Prozessierung in weiten Bereichen einstellen lassen.

Dies wirft die Frage nach einer systematischen Untersuchung von Einsatzgrenzen der Werkstoffe und die damit verbundenen Grenzen von Aktorbetrieb und -leistungsfähigkeit auf. Dafür müssen die Materialien mit geeigneten Verfahren auf ihre Eigenschaften untersucht, und die Ergebnisse systematisch charakterisierten Aktoren gegenübergestellt werden. Ziel ist es, die für den Aktoreinsatz kritischen Werkstoffeigenschaften zu quantifizieren und so ein Verfahren zur Materialprüfung vorzuschlagen. Bei der Evaluierung neuer Aktorwerkstoffe kann dann auf umfangreiche Aktorcharakterisierungen verzichtet werden. Diese Untersuchungen werden am Beispiel der Mikroaktoren aus dem Photoresist SU-8 mit galvanisch abgeschiedenen Heizelementen aus Nickel durchgeführt.

Des Weiteren bietet sich Raum zur Optimierung der Aktoren: Die Polymeraktoren müssen durch eigens aufgebrachte mäandrierte Leiterbahnen indirekt geheizt werden. Durch geeignete Führung dieser Leiterbahnen kann die Leistungseinkopplung lokal angepasst und das entstehende Temperaturprofil homogenisiert werden. Dies erlaubt eine Verbesserung der Aktorleistung ohne Steigerung der thermischen Werkstoffbelastung. Eine neuartige Methode für diese Optimierung wird in dieser Arbeit vorgestellt.

1.2 Gliederung der Arbeit

Zu Beginn der Arbeit wird in Kapitel 2 der Stand der Technik zu Technologien, dem Einsatz und der Leistungsfähigkeit elektrothermischer Mikroaktoren diskutiert. Hieraus leiten sich die konkreten Forschungsfragen ab.

Den eigenen Untersuchungen vorangestellt ist Kapitel 3, das die Randbedingungen der Arbeit hinsichtlich verfügbarer Technologien, Grenzen der Fertigung und vorhandener Messtechnik darstellt. In den Kapiteln 4 und 5 werden die Eigenschaften von SU-8 und galvanisch abgeschiedenem Nickel in Abhängigkeit der Prozessierung diskutiert und anhand zahlreicher Versuche quantifiziert. Hieraus leiten sich zum einen die Einsatzgrenzen der Werkstoffe ab, zum anderen entsteht eine umfassende Datenbasis zur Materialmodellierung innerhalb des FEM-Modells, das zum Aktorentwurf in Kapitel 6 erarbeitet wird. Auf Basis dieses Modells wird die Optimierung durch Homogenisierung der Betriebstemperatur vorgestellt und Aktoren simulatorisch verglichen. Der messtechnische Vergleich, sowie die umfangreiche Charakterisierung verschiedener Aktorvarianten im Hinblick auf die Ergebnisse der vorangegangenen Abschnitte erfolgt in Kapitel 7.

Der Einsatz der optimierten Aktoren wird in Kapitel 8 am Beispiel einer neuartigen Anwendung gezeigt: Die Taste einer klassischen Fernbedienung für das häusliche Umfeld wird mit einem Array von bistabilen Mikroaktoren versehen, um durch haptische Icons situationsbezogene Informationen darzustellen. Hierzu werden erstmals zweilagige Aktoren für eine Bewegung aus der Fertigungsebene heraus (Out-of-Plane) eingesetzt.

Die Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung der Ergebnisse und der Diskussion sich anschließender Fragestellungen in Kapitel 9.



2 Stand der Technik elektrothermischer Mikroaktoren

Im Jahr 1988 stellen *Riethmüller et. al.* den ersten miniaturisierten elektrothermischen Aktor nach dem Vorbild eines Bimetallschalters vor: Der mikrostrukturierte Schichtverbund besteht aus Silizium und Gold und hat eine Größe von $500 \times 100 \times 4 \mu\text{m}^3$.

Diese Aktorklasse definiert sich durch die Nutzung der thermischen Ausdehnung von eingespannten mikrostrukturierten Stäben oder Platten. Die relative thermische Ausdehnung der Festkörper selbst beträgt meist nur wenige Promille. Um diese geringe Längenänderung in technisch nutzbare Wege und Kräfte umzuformen, werden verschiedene Festkörpergetriebe eingesetzt, aus denen sich typische Aktorgrundformen herausgebildet haben. Durch lokale Erzeugung Joule'scher Wärme wird die Aktorgeometrie definiert ausgedehnt und eine Bewegungs- oder Kraftrichtung erzeugt. Werden halbleitende oder leitende Werkstoffe für Aktoren eingesetzt, erfolgt die Wärmeerzeugung meistens aus einem Stromfluss durch die vollständige Geometrie. Durch Verringerung des Strukturquerschnitts lässt sich die Leistungsaufnahme lokal konzentrieren. Der Aktor besteht dann nur aus einer strukturierten Materialschicht, dem Dehnungskörper. In seltenen Fällen wird der Dehnungskörper durch eine zweite strukturierte Schicht mit hoher Leitfähigkeit indirekt geheizt. Der Heizer verbessert die räumlich konzentrierte Wärmeerzeugung. Kommt ein Polymer als Werkstoff für den Dehnungskörper zum Einsatz, ist immer ein Heizer nötig.

Abbildung 2.1a) zeigt einen siliziumbasierten Aktor mit lokal verringertem Strukturquerschnitt, ein indirekt geheizter Polymeraktor aus SU-8 mit galvanisch abgeformtem Metallmäander an seiner Unterseite ist in Abbildung 2.1b) dargestellt.

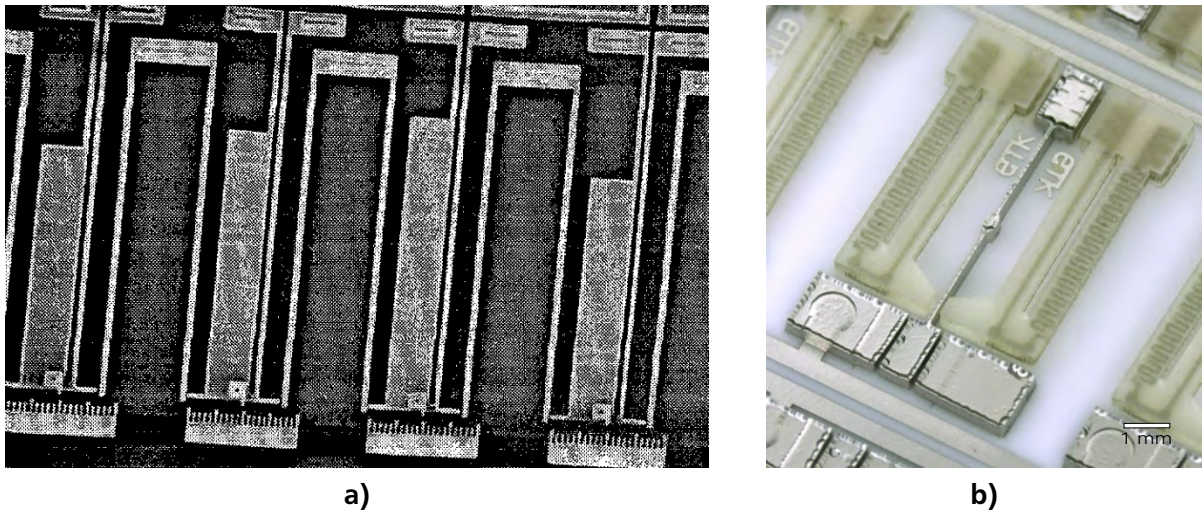


Abbildung 2.1.: Konzepte zur lokalen Wärmeerzeugung: a) Direkt geheizter siliziumbasierter Aktor nach *Comtois et. al.* mit lokal verringertem Strukturquerschnitt [11]; b) Indirekt geheizte Polymeraktoren aus SU-8 nach *Staab* mit mäandrierten Heizern an der Unterseite [12]

Im Folgenden wird ein Überblick über elektrothermische Mikroaktoren gegeben. Dabei wird zunächst auf die Grundgeometrien, das Aktorverhalten, die Leistungsdaten und die Applikationen der Aktoren im Allgemeinen eingegangen. Anschließend konzentriert sich die Betrachtung auf Polymeraktoren aus SU-8. Es werden die besonderen Eigenschaften, Einschränkungen und Fragestellungen dieser Aktoren erläutert. Aus diesem Stand der Technik leiten sich schließlich die Forschungsfragen dieser Arbeit ab.

2.1 Elektrothermische Mikroaktoren im Überblick

Der folgende Abschnitt gibt einen Überblick über elektrothermische Mikroaktoren im Allgemeinen. Der Aufarbeitung liegen 115 Veröffentlichungen zu Grunde, von denen hier die wichtigsten angeführt werden.

2.1.1 Grundformen

Die in der Literatur verfügbaren Aktorgrundformen werden im Folgenden vorgestellt. Abbildung 2.2 zeigt die Getriebe, gegliedert nach der Bewegung in der Fertigungsebene (In-Plane, IP) und aus der Fertigungsebene heraus (Out-of-Plane, OoP).

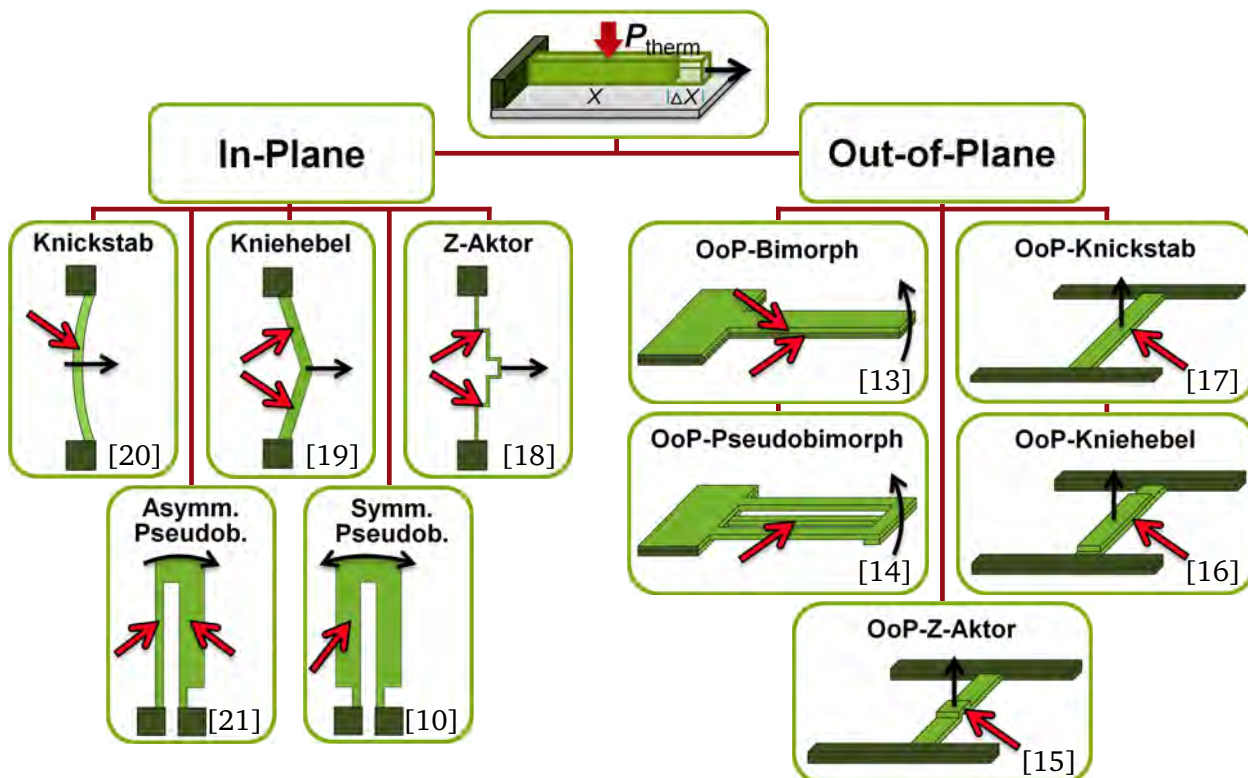


Abbildung 2.2.: Grundformen elektrothermischer Mikroaktoren aus der Literatur

Als erster In-Plane Aktor wird der Pseudobimorph-Aktor von *Guckel et. al.* in 1992 vorgestellt [21]. Diese U-förmige Geometrie weist zwei unterschiedlich breite Schenkel auf, die durch einen Mittenabstand thermisch und elektrisch von einander isoliert sind. Durch die geringere Breite des aktiven Schenkels tritt dort bei der Bestromung des Aktors ein größerer Spannungsabfall und damit eine lokale Temperaturerhöhung auf. Die entstehende Dehnung bewirkt die Auslenkung des Aktors. Mit dieser Geometrie lassen sich hohe Auslenkungen und geringe Kräfte erzeugen. Der Kniehebel, vorgestellt von *Cragun et. al.* im Jahr 1999 [19], besteht aus zwei einseitig eingespannten, zueinander gewinkelten Balken, die bei thermischer Dehnung durch Verwinden eine Auslenkung erzeugen. Dieser Aktor eignet sich für hohe Kräfte. Eine Variante des Kniehebels ist der Z-Beam von *Guan et. al.* aus dem Jahr 2010 [18] dar. Durch die rechtwinklige Balkenanordnung entsteht bei thermischer Dehnung ein Biegemoment, das zur Aktorauslenkung führt. Im Vergleich zum Kniehebel sind die darstellbaren Kräfte geringer, in abgeschaltetem Zustand ist die Eigensteifigkeit der Geometrie jedoch sehr klein, was bei gegensinniger Aktoranordnung, bspw. bei Umschaltern, von

Vorteil ist. *Park et. al.* stellen im Jahr 2008 einen aktuierten Knickstab vor, der bei thermischer Anregung durchschnappt [20]. Dieser Antrieb weist zwei diskrete Stellungen auf. Eine Sonderform des Pseudobimorph-Aktors wird von Staab speziell für indirekt beheizte elektrothermische Polymeraktoren entwickelt [10]. Der Heizer sorgt durch seine Eigensteifigkeit für eine Versteifung des geheizten Balkens, die durch Schwindung im Laufe der Polymerprozessierung ein Verziehen des Aktors nach sich zieht. Daher muss diese Versteifung durch einen Heizer auf dem kalten Balken ausgeglichen werden.

Die Grundformen der Out-of-Plane Aktoren entsprechen den In-Plane-Geometrien. Im Jahr 1988 stellen *Riethmüller et. al.* den OoP-Bimorph als zweischichtigen Materialverbund vor [13]. Der in 2003 von *Chen et. al.* entwickelte OoP-Pseudobimorph-Aktor besteht aus einzelnen Balken in zwei Fertigungsebenen [14]. Der OoP-Z-Beam wird im Jahr 2009 von *Varona et. al.* eingesetzt [15]. *Kim et. al.* stellen in 2013 den OoP-Kniehebel vor [16]. Ein beidseitig eingespannter Balken ist in der Nähe der Einspannungen eingekerbt. Hierdurch entsteht in dem Balken bei Erwärmung ein Biegemoment, das zum Aufwölben und damit zur Aktorbewegung führt. Der beidseitig eingespannte Balken ohne Einkerbung, der OoP-Knickstab-Aktor wird von *Seki et. al.* im Jahr 1997 präsentiert [17].

Unter allen vorgestellten Grundformen weisen die Pseudobimorph-Varianten eine entscheidende Besonderheit auf: Ihre Bewegung entsteht durch eine Temperaturdifferenz innerhalb der Geometrie. Erwärmt man sie homogen, stellt sich eine Längung senkrecht zur Auslenkungsrichtung ein. Damit sind Pseudobimorph-Geometrien unempfindlich gegenüber Schwankungen der Umgebungstemperatur und für den Einsatz in technischen Geräten abseits von Temperaturschaltern besonders geeignet.

2.1.2 Grundsätzliches Aktorverhalten

Abbildung 2.3 zeigt das charakteristische Verhalten elektrothermischer Aktoren und typische Kennwerte. Kapitel 2.1.1 zeigt, dass die Längenänderungen der beheizten Aktorareale durch Festkörpergetriebe umgeformt werden. Die Größe eines Aktors bestimmt sich damit zu der „Aktiven Fläche“, die die beheizten Elemente und das Getriebe umfasst.



Abbildung 2.3.: Charakteristisches Aktorverhalten: a) Aktive Grundfläche eines Pseudobimorph-Aktors nach Staab [10] mit geheizten Elementen und Festkörpergetriebe; b) PT1-Zeitverhalten für Kraft und Auslenkung mit zeiteffizientem Arbeitspunkt bei $2 \cdot \tau$ (86,5 % der zeitl. Endwerte); c) Statische Kennlinie mit Leerlaufauslenkung ξ_{Leer} und Blockierkraft F_{Block} , beide Werte sind proportional zur el. Steuerleistung, ebenso wie die Maximaltemperatur T_{Max} des Aktors

Das zeitliche Verhalten der Aktoren entspricht dem eines PT1-Glieds: Die Wärmekapazität des beheizten Elements wird durch den elektrisch erzeugten Wärmestrom aufgeladen, aus den Wärmeübergangswiderständen in die Umgebung folgt die Zeitkonstante τ . Dabei stellt sich der Zeitpunkt $2 \cdot \tau$ bei 86,5 % der zeitlichen Endwerte von Kraft und Auslenkung als zeiteffizienter Arbeitspunkt heraus. Der Zeitpunkt wird daher zur dynamischen Beschreibung der Aktoren verwendet und als „Ansprechzeit“ t_A bezeichnet.

Zur statischen Beschreibung des Aktorverhaltens dient die statische Kennlinie mit der Leerlaufauslenkung ξ_{Leer} und der Blockierkraft F_{Block} . Beide Werte sind proportional zur elektrischen Steuerleistung, ebenso wie die Maximaltemperatur T_{Max} des Aktors. Die maximale Steuerleistung bestimmt sich nach der maximalen Betriebstemperatur des Werkstoffs für den Dehnungskörper.

2.1.3 Vergleich der Leistungsdaten

Aus den in der Literatur veröffentlichten Daten lässt sich ein Überblick über die Leistungsfähigkeit elektrothermischer Mikroaktoren erstellen, die Informationen zu den einzelnen Aktoren sind aber oft unvollständig. Anstelle der Steuerleistung ist oft nur eine elektrische Größe angegeben, die Kräfte der Aktoren werden sehr selten gemessen. Ebenso wird in vielen Fällen die Betriebstemperatur nicht diskutiert, oder gar die maximale Betriebstemperatur für einen stabilen Einsatz bestimmt. Auch das dynamische Verhalten der Aktoren wird selten erwähnt, die statische Kennlinie der Leerlaufauslenkung ist die typische Charakterisierung. Daher zeigen die Rechercheergebnisse besonders hinsichtlich Temperaturen und Kräften nur Trends auf.

Die Leistungsfähigkeit der Mikroaktoren weist einen sehr weiten Bereich auf. Die Aktoren nehmen aktive Flächen von $118 \mu\text{m}^2$ bis 825 mm^2 und erreichen Auslenkungen zwischen 35 nm und $621 \mu\text{m}$, sowie Kräfte von $2,8 \mu\text{N}$ bis 30 mN. Dabei liegt die Leistungsaufnahme zwischen 0,5 mW und 6 W.

Abbildung 2.4 stellt die Leistungsdaten „aktive Fläche“, „Leerlaufauslenkung“, „Blockierkraft“, „elektrische Steuerleistung“ und „Betriebstemperatur“ als Boxplot dar. Dabei lassen sich drei Gruppen unterscheiden, da die Fertigungstechnologien und Materialien die Leistungsfähigkeit und die Abmessungen der Aktoren beeinflussen: Mit 50 % besteht die Mehrzahl der in der Literatur gefundenen Aktoren aus Silizium und ist mit den Technologien der Bulk- oder Oberflächenmikromechanik hergestellt. Weitere 21% bestehen aus galvanisch abgeformtem Metall (Ni, Al, Au, Fe), gefolgt von metallisiertem SU-8 mit 14 %.

Entsprechend der Fertigungstechnologien und der möglichen Strukturabmessungen haben die Aktoren aus Silizium die kleinste Fläche, die SU-8-Aktoren sind deutlich größer. Dennoch liegen die Auslenkungen der SU-8-Aktoren in der gleichen Größenordnung. Dies ist der mit maximal 200°C geringeren Temperaturfestigkeit des Polymers geschuldet. Da Polymeraktoren aber hohe Schichtdicken bis in den dreistelligen μm -Bereich aufweisen, erreichen sie hohe Kräfte im mN-Bereich. Die Leistungsaufnahme der SU-8-Aktoren ist im Vergleich zu den übrigen Mikroaktoren geringer. Da oft Pseudobimorph-Aktoren eingesetzt werden, kann die Wärmeerzeugung durch die Notwendigkeit der indirekten Beheizung gut lokal begrenzt und unnötige Wärmeverluste vermieden werden.

2.2 Applikationen

Abbildung 2.5 zeigt die häufigsten Applikationen für elektrothermische Mikroaktoren im Überblick. Es fällt auf, dass der mit 38 % größte Anteil der Publikationen lediglich die Aktoren selbst vorstellt,

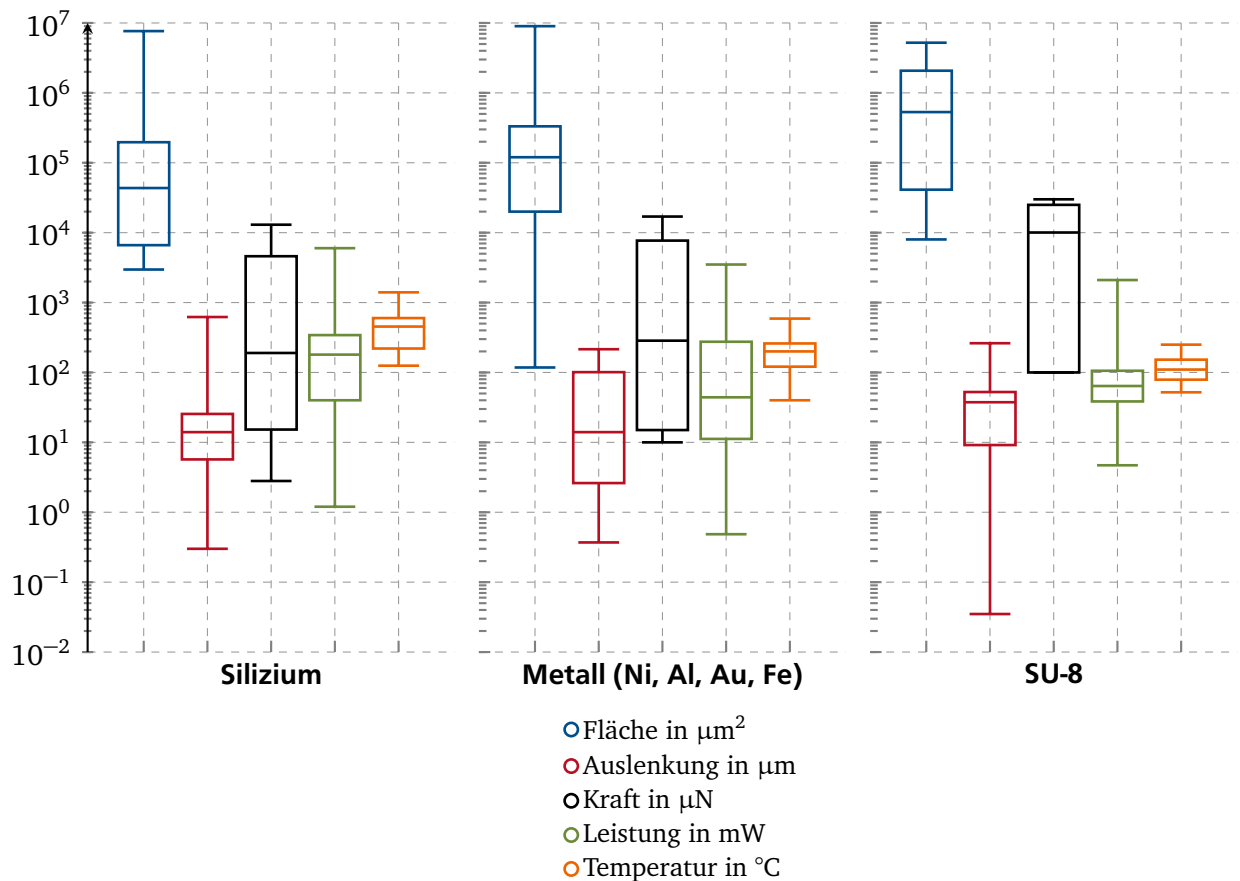


Abbildung 2.4.: Boxplots der Leistungsdaten elektrothermischer Aktoren, gegliedert nach Silizium, Metall und SU-8; Es sind der Median, beide Quartile, und die Extremwerte dargestellt (Datenbasis: 115 Publikationen)

ohne eine Anwendung zu verfolgen. Die Positionierung von Bauteilen, bspw. Mikrolinsen oder -spiegel, wird überwiegend als Anwendung genannt, gefolgt von Mikrogreifern und Schaltern, wie z.B. RF- oder DC-Relais.

Die Positionierung von Objekten bekannter Masse im Raum ist für Mikroaktoren eine dankbare Applikation, da keine unerwarteten und großen Kräfte auftreten. Bereits im Jahr 1996 setzen Comtois *et. al.* siliziumbasierte Pseudobimorph-Aktoren zur Justage eines würfelförmigen Spiegelbauteils ein. [29]. Drei Jahre später zeigen Butler *et. al.*, dass sich Mikroaktoren durch gepulste Ansteuerung in ihrer Position regeln lassen [30]. Kopka *et. al.* setzen die Enden von Glasfasern auf Pseudobimorph-Aktoren und schaffen so einen 1x4 multistabilen Schalter zur Faserjustage [31]. Out-of-Plane Aktoren zum Verschieben und Verkippen von Spiegeln werden von Schweizer *et. al.* [32] und Atre [33] vorgestellt. Sehr große Stellwege von 600 μm bei einer Aktorlänge von 1,5 mm erzielen Wu *et. al.* mit einer 1-DOF-Plattform für eine polymere Mikrolinse [23]. Dies ist durch Bimorph-Aktoren aus Al und SiO_2 mit einer Dicke von 1,1 μm möglich. Ein freistehender Mikrodraht aus Wolfram und Carbon mit einem Durchmesser von 400 nm erreicht Auslenkungen bis 600 nm und ist von Chang *et. al.* zur Feinjustage von anhaftenden Nanoobjekten vorgesehen [24].

Mikrogreifer aus Silizium mit einem Stellweg von 16 μm werden, analog zum Mikrospiegelbauteil, von Comtois *et. al.* im Jahr 1996 vorgestellt [29]. Im gleichen Jahr zeigen Greitmann *et. al.* einen aluminiumbasierten Mikrogreifer für das automatisierte Probenhandling mit integrierter Kraftmes-

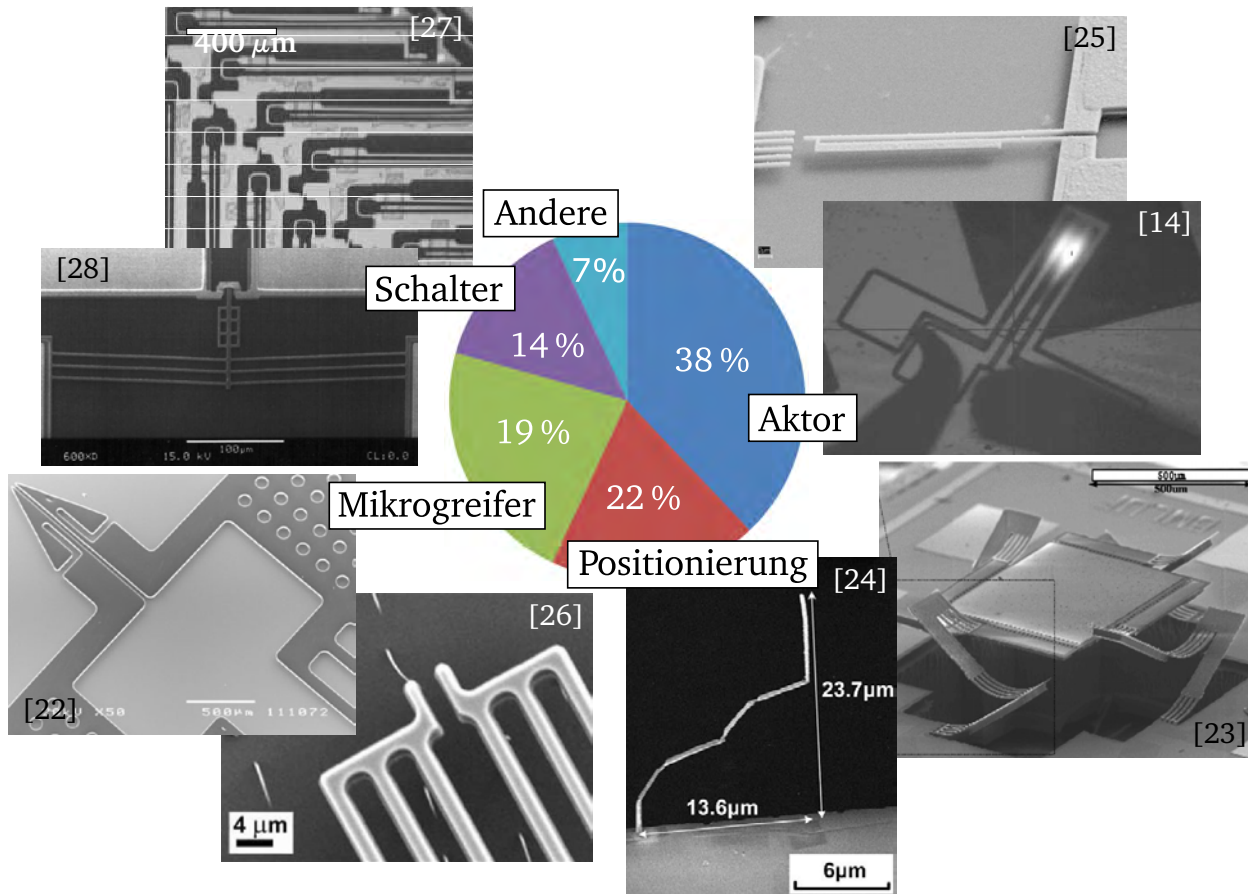


Abbildung 2.5.: Applikationen elektrothermischer Mikroaktoren mit typischen Beispielen aus der Literatur

sung [34]. Ein hochminiaturisierter Greifer mit einer Grundfläche von $200 \times 100 \mu\text{m}^2$ und einem Stellweg von $1,2 \mu\text{m}$ wird von *Nordström et. al.* zur Positionierung von CNT's eingesetzt [26]. Auch der erste Einsatz von SU-8 als Konstruktionswerkstoff für elektrothermische Aktoren von *Nguyen et. al.* im Jahr 2004 gilt einem Mikrogreifer [22]: Der Greifer besteht aus zwei achsensymmetrisch angeordneten Pseudobimorph-Aktoren mit Griffbacken, die flächig mit Titan und Platin beschichtet sind, und dient mit einem Stellweg von $100 \mu\text{m}$ zur Zellmanipulation.

Elektrothermisch betriebene Schalter finden sich für DC- und RF-Anwendungen. Da die Mikroaktoren permanent bestromt werden müssen, um ihre Position zu halten, und monostabile Relaiskonzepte daher nicht energieeffizient sind, kommen hier meistens zusätzliche mechanisch oder magnetisch bistabile Haltemechanismen zum Einsatz. Im Jahr 1997 stellen *Seki et. al.* das erste monostabile Mikrorelais mit einem OoP-Knickstab-Aktor vor [17]. *Wu et. al.* nutzen OoP-Bimorph-Aktoren um eine federnd gelagerte Kontaktwippe zu betätigen [35]. Die Schaltposition wird magnetostatisch gehalten. Ein mechanisch bistabiler Haltemechanismus mit rechtwinklig angeordneten Pseudobimorph-Aktoren, die sich an ihren Köpfen verhaken, findet sich bei *Agrawal et al.* [27]. Unter den Mikrorelais finden sich überwiegend In-Plane-Konzepte. Dabei werden Kontaktabstände zwischen $3 \mu\text{m}$ [36] und $114 \mu\text{m}$ [37] geschaltet. Die aufgenommenen elektrischen Leistungen liegen zwischen 12 mW [38] und 935 mW [39]. Mit bis zu 3 A lässt der Entwurf von *Qiu et. al.* die größten Halteströme zu [37]. Eine umfassende Übersicht über Mikrorelais mit Fokus auf elektrothermische Aktuierung findet sich bei *Staab* [10].

2.3 Polymere elektrothermische Mikroaktoren aus SU-8

Im Folgenden wird auf Mikroaktoren mit SU-8 als Konstruktionswerkstoff näher eingegangen und einige besondere Systeme vorgestellt. Abschließend werden die am Institut EMK entwickelten Mikroaktoren diskutiert.

Zum großen Teil finden sich in der Literatur Pseudobimorph-Aktoren mit flächigem Dünnschichtheizer aus einigen 100 nm Chrom, Gold, Kupfer oder Platin. Die Anwendung ist dabei häufig ein Greifer zur Zellmanipulation. Neben dem bereits erläuterten System von *Nguyen et. al.* [22] stellen *Chronis et. al.* im Jahr 2005 einen Greifer als Öffner vor, der bei einer aktiven Fläche von $200 \times 40 \mu\text{m}^2$ und einer Steuerleistung von 4,7 mW einen Stellweg von $14 \mu\text{m}$ aufweist [40]. Analog dazu präsentieren *Solano et. al.* einen Greifer für größere Objekte bis $260 \mu\text{m}$ [41]. Abbildung 2.6 zeigt die Systeme.

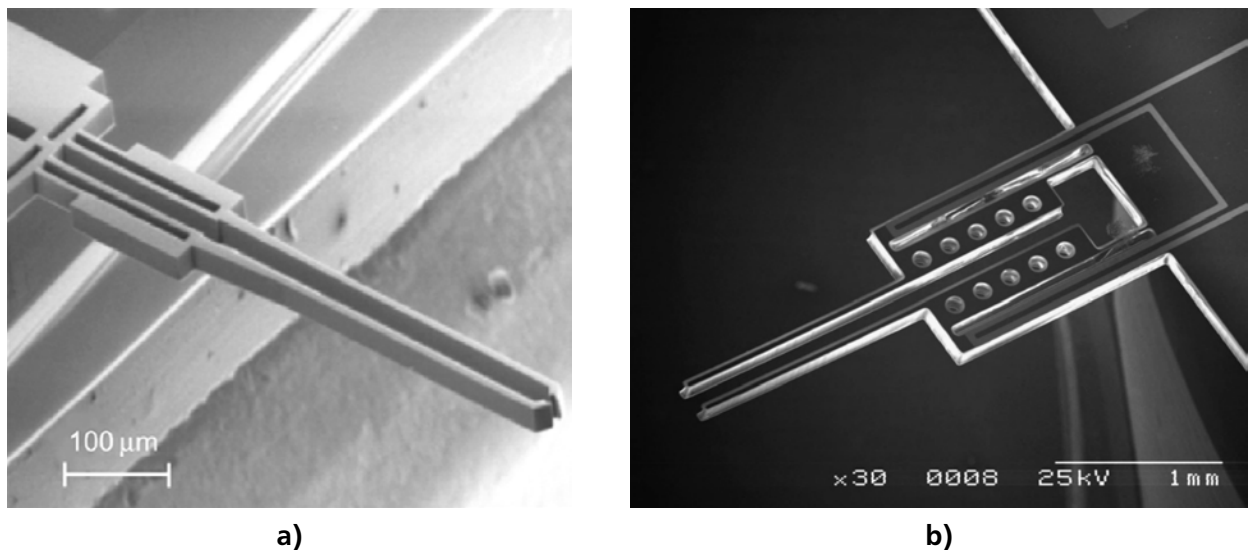
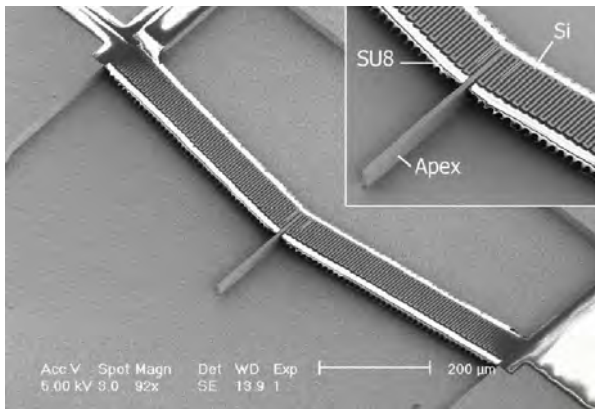


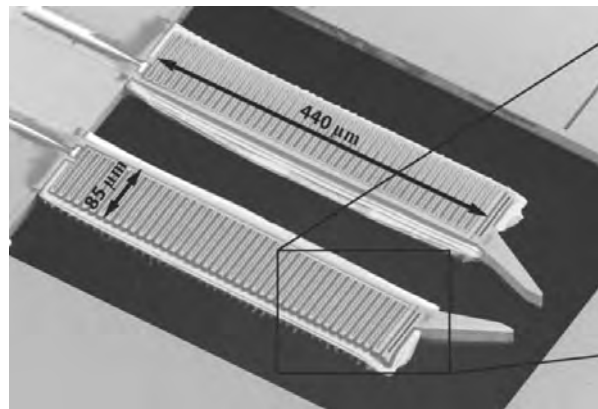
Abbildung 2.6.: Elektrothermisch aktuierte Mikrogreifer mit Pseudobimorph-Aktoren aus SU-8: a) Nach *Chronis et. al.* mit einem Stellweg von $14 \mu\text{m}$ [40]; b) Nach *Solano et. al.* mit einem Stellweg von $260 \mu\text{m}$ [41]

Eine hybride Konstruktion von Aktorelementen stellt die Arbeitsgruppe der Technischen Universität Delft vor: Ein mäandriertes Silizium-Skelett mit hohem Aspektverhältnis wird vollständig in SU-8 eingebettet. Abbildung 2.7 zeigt den Kniehebelaktor von *Lau et. al.* [42] und einen Greifer mit einzelnen Aktorelementen nach *Krecinic et. al.* [43].

Zwischen den Schleifen des Silizium-Mäanders ist das SU-8 beidseitig festgebremst. Hierdurch wird bei thermischer Ausdehnung des Materials die vertikale Dehnung unterdrückt, was unter der Annahme der Volumenkonstanz eine im Vergleich stärkere laterale Dehnung zur Folge hat. Die Aktorelemente zeigen im Betrieb sowohl eine Längung, als auch eine Krümmung. Daher eignen sie sich für beide gezeigten Anwendungen. Der Kniehebel-Aktor erzeugt bei einer aktiven Fläche von $1000 \times 100 \mu\text{m}^2$ bei einer Steuerleistung von 16 mW eine Leerlaufauslenkung von $10 \mu\text{m}$ und eine hohe Blockierkraft von 100 mN. Dabei beträgt die maximale Betriebstemperatur 150°C . Die Krümmung der Aktorelemente für den Mikrogreifer erlaubt bei einer aktiven Fläche von $440 \times 85 \mu\text{m}^2$ je Aktorelement einen Stellweg von $34 \mu\text{m}$ bei einer Blockierkraft von 20 mN. Die hohen Kräfte sind dabei der Versteifung durch das Silizium-Skelett zuzuschreiben.



a)

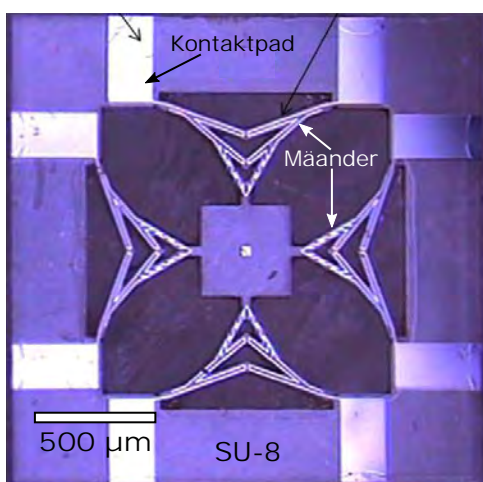


b)

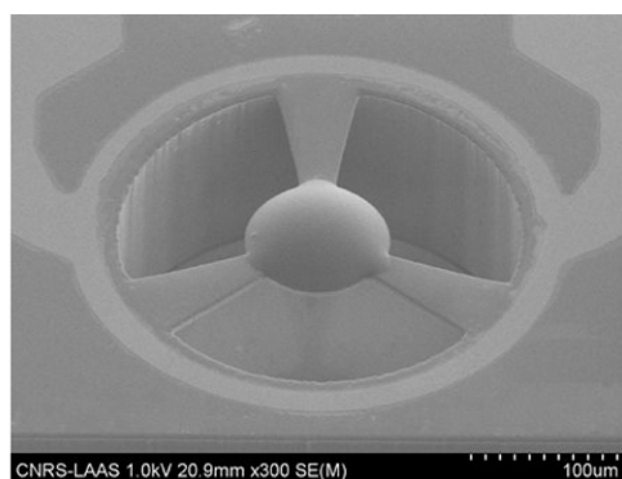
Abbildung 2.7.: Aktorelemente aus SU-8 mit Silizium-Skelett zur Steigerung der lateralen Dehnung des SU-8-Körpers: a) Kniehebelaktor nach *Lau et. al.* [42]; b) Mikrogreifer mit einzelnen Aktorelementen nach *Krecinic et. al.* [43]

Yang et. al. nutzen einen ähnlichen Ansatz für einen Festplattenlesekopf [44]: Ein „Kammaktor“ besteht aus einem Siliziumbalken mit seitlichen Zinken, die mit SU-8 vergossen sind. Die thermische Dehnung der SU-8-Strukturen führt zur Torsion des Kammaktors und damit der lateralen Justage des Lesekopfs um bis zu 35 nm.

Ein strukturierter Heizer kommt bei *Lee et. al.* in einer xy-Positionierplattform für die Rastersondenmikroskopie zum Einsatz [45]. Eine quadratische Plattform mit ca. 0,5 mm Kantenlänge ist an vier elektrothermischen Aktoren der Grundfläche von $750 \times 400 \mu\text{m}^2$ aufgehängt. Die Aktoren haben mit dem „Tower-Shape“ eine außergewöhnliche Grundform, ähnlich zu Zugdreiecken mit mehreren Segmenten. Um alle Segmente auf eine gleichmäßige Betriebstemperatur zu bringen, wird der Heizer strukturiert und sorgt so für eine gezielte örtliche Verteilung der Wärmezeugung. Außerdem wird der Heizer zwischen zwei SU-8-Schichten vergraben und so die Energieeffizienz des Aktors erhöht. Bei Betriebstemperaturen bis 250 °C werden so Stellwege bis 41 µm erreicht. Abbildung 2.8a) zeigt die Positionierplattform.



a)



b)

Abbildung 2.8.: Elektrothermische Justagesysteme: a) xy-Positionierplattform mit „Tower-Shape“-Aktoren und mäandriertem Heizer nach *Lee et. al.* [45]; b) Linsenjustage mit einem OoP-Knickstab-Aktor nach *Reig et. al.* [46]

Eine Applikation des OoP-Knickstab-Aktors zeigen *Reig et. al.* in einem radialsymmetrischen MOEMS-System, bestehend aus einer an drei Armen aufgehängten Polymerlinse mit 100 μm Durchmesser [46]. Die Anordnung wird vom Rand geheizt, was zum Aufwölben der Aufhängungen und der Linsenbewegung aus der Fertigungsebene führt. Bei einer Steuerleistung von 47 mW werden Stellwege bis 8 μm erreicht. Abbildung 2.8b) zeigt das gefertigte System.

Am **Institut EMK** hat *Eicher* im Jahr 2002 mit der Erforschung mechanisch bistabiler Schrittantriebe aus SU-8 [8] begonnen. Im Rahmen seiner Dissertation ist eine miniaturisierte Inchworm-plattform mit elektrothermischen Aktoren für Vorschub und bistabile Klemmung eines Läufers entstanden. Die Plattform ist 32 x 22 mm² groß und hat eine Schichtdicke von 500 μm . Ein Stellweg von 20 mm kann mit einer Schrittweite von 50 μm aufgelöst werden. Dabei wird eine Haltekraft von 650 mN erreicht. Im Rahmen dieser Arbeit werden die mikrotechnischen Fertigungsprozesse etabliert, sowie die prinzipielle Fertigung und Charakterisierung der Mikroaktoren gezeigt.

Die in der Plattform eingesetzten Kniehebel-Aktoren haben eine Fläche von 10 mm x 350 μm . Sie erreichen bei einer Steuerleistung von 300 mW eine Maximaltemperatur von 150 °C und eine Leerlaufauslenkung von 350 μm . Dabei ist der Heizer aus Aluminium flächig auf die Aktoroberseite aufgesputtert. Abbildung 2.9a) zeigt die Aktoren.

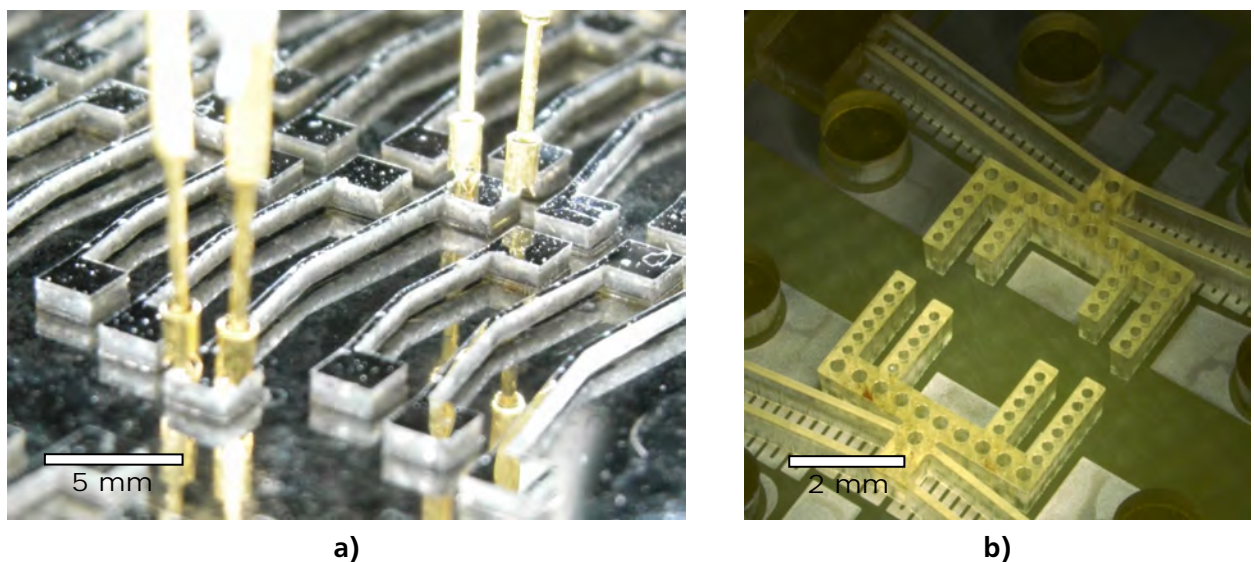


Abbildung 2.9.: Am Institut EMK entwickelte Kniehebel-Aktoren: a) Mit flächigem Dünnschicht-Heizer auf der Oberseite nach *Eicher* [8]; b) Mit mäandriertem galvanisch geformtem Heizer auf Substratebene von *Kohlstedt* [9]

In den anschließenden Arbeiten setzen *Staab* und *Kohlstedt* galvanisch abgeformte Heizer an der Unterseite der Aktoren oder auf Substratebene ein. Grund hierfür ist die Kontaktierbarkeit der Heizer durch Leiterbahnen auf der Substratebene, was die Verschaltung von Aktorarrays ermöglicht. Die Dicke der Galvanoschichten liegt im μm -Bereich. Dies hat eine sehr hohe mechanische Steifigkeit und einen zu geringen elektrischen Widerstand des Heizers zur Folge. Abhilfe schafft die Mäandrierung, wie in Abbildung 2.9b) zu sehen.

Staab entwickelte ein elektrothermisches Mikrorelais mit magnetostatisch bistabiler Haltung der Schalterstellungen. Abbildung 2.10a) zeigt das finale Relaiskonzept: Zwei parallelgeschaltete bidirektional angesteuerte Pseudobimorph-Aktoren schalten einen Schaltkontakt zwischen zwei Endlagen um. Die Haltung der Schaltposition geschieht durch Permanentmagnete, deren Feld durch eine magnetische Flussführung auf die Schaltkontakte konzentriert wird. Im Rahmen der Arbeit

entstehen mehrere Demonstrator-Generationen und verschiedene Varianten von Pseudobimorph-Aktoren werden im Dauertest untersucht. Durch die magnetostatische Haltung müssen die Aktoren bei jedem Schaltspiel ausreichend Kraft und Weg aufbringen, um den Schaltkontakt von der Endlage abzuheben und über die Mittelstellung hinweg zu bewegen. Bei unidirektionalem Aktorbetrieb nur in Schaltrichtung summiert sich dabei eine permanente Nulllagenverschiebung entgegen der Betriebsrichtung auf.

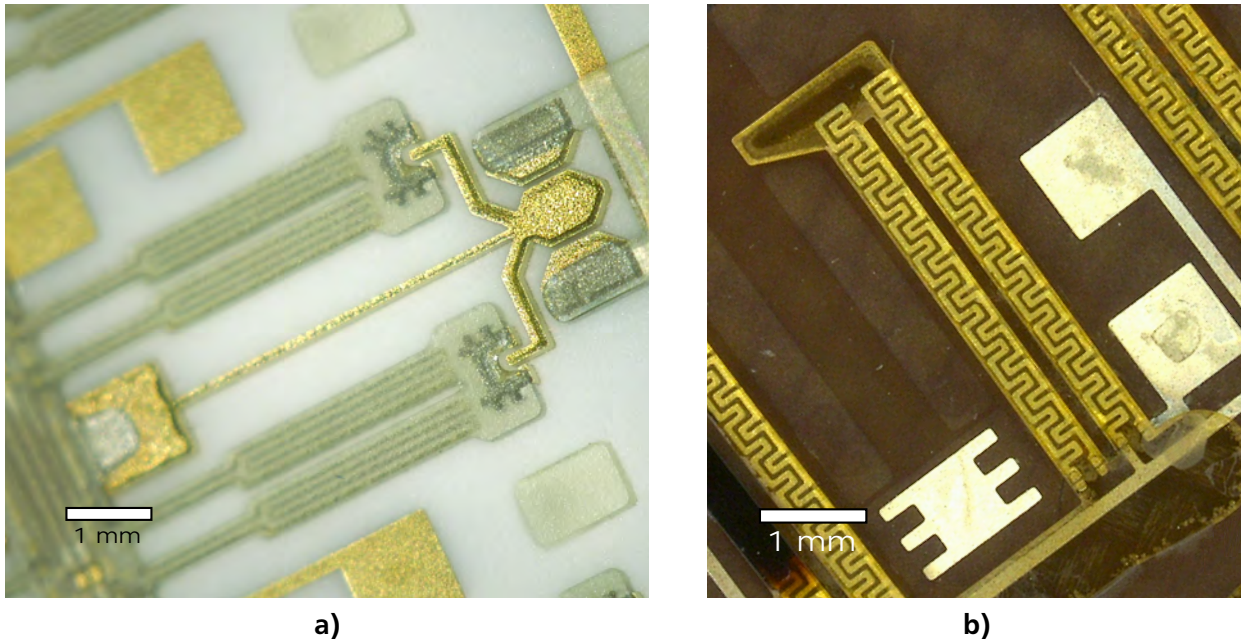


Abbildung 2.10.: Elektrothermisch aktuiertes Mikrorelais mit magnetostatisch bistabiler Haltung nach Staab [10]: a) Relaisdemonstrator mit bidirektionalem Aktuierungskonzept; b) Unidirektionaler Pseudobimorph-Aktor mit quer verschliffenem Mäander

Staab kompensiert diese Eigenschaften zum einen durch den Einsatz von langlebigen Dünnschichtheizern, zum anderen durch einen bidirektionalen Aktorbetrieb, bei dem sich plastische Verformungen der Aktoren ausgleichen. Hiermit schaltet das Mikrorelais über mehrere Millionen Zyklen erfolgreich und belegt die Dauerbetriebsfestigkeit der Polymeraktoren.

Der Pseudobimorph-Aktor des Relais, dargestellt in Abbildung 2.10a), weist einen am Fuß eingeschnürten Dehnungskörper und in Längsrichtung mäandrierte Dünnschicht-Heizelemente auf. Hierdurch erreicht der Aktor bei einer Steuerleistung von 135 mW eine Leerlaufauslenkung von 71 μm . Dies ist ein deutlicher Gewinn gegenüber der in Abbildung 2.10b) gezeigten flächengleichen Vorgängervariante mit konstanten Balkenquerschnitten, die bei gleicher Steuerleistung 35 μm Auslenkung aufweist. Die Gründe hierfür sind der galvanisch hergestellte Heizer, der den Aktor mit seiner vergleichsweise hohen Schichtdicke selbst hemmt, sowie der steifere Dehnungskörper. Durch die hohen Steifigkeiten bringt der Aktor jedoch höhere Kräfte auf.

2.4 Ableiten des Forschungsbedarfs

Der Fokus der bisherigen Arbeiten liegt auf funktionsfähigen Mikrosystemen. Dabei werden die Grenzen des Aktorbetriebs und die Prozessierung von Dehnungskörper und Heizer im Rahmen von Vorversuchen im Hinblick auf anforderungsgerechte Mikroaktoren ermittelt.

Besonders die Ergebnisse von *Staab* zeigen aber die Notwendigkeit einer systematischen Untersuchung. Das beobachtete Einlaufverhalten der Aktoren ist in Abbildung 2.11 dargestellt. Beim unidirektionalen Betrieb baut sich in den ersten Betriebsminuten eine hohe Nulllagenverschiebung bis ca. 37% des Aktorhubs auf. In mehr als 30 Betriebsstunden zeigt sich ein reproduzierbares Einlaufverhalten auf einen festen Endwert, eine Langzeitdrift des Endwerts kann aber nicht ausgeschlossen werden.

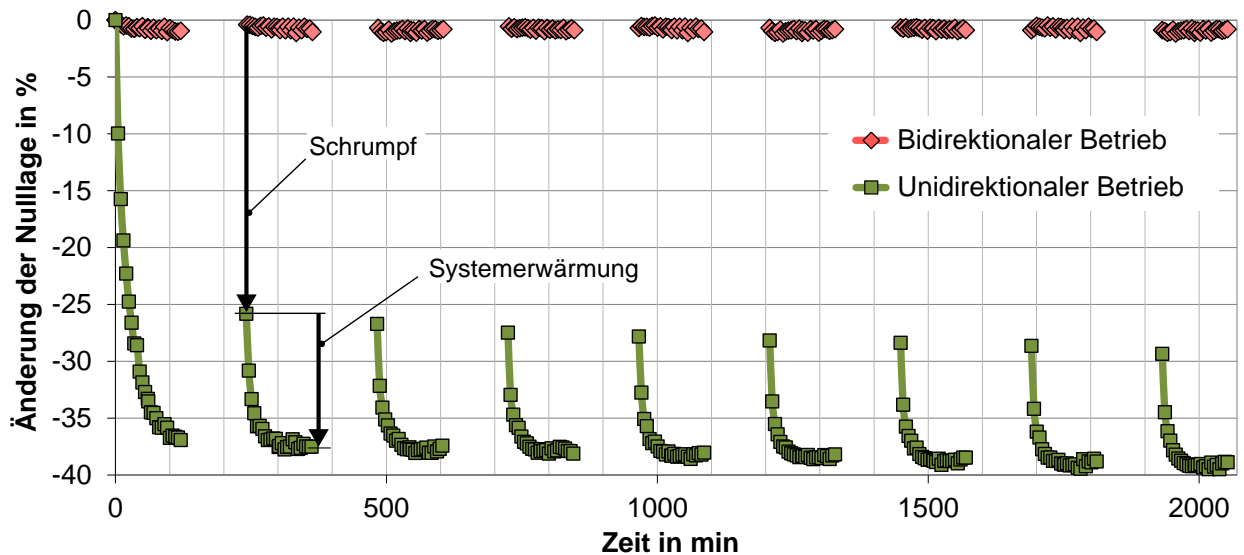


Abbildung 2.11.: Änderung der Nulllage elektrothermischer Mikroaktoren aus SU-8 bei bidirektionalem und unidirektionalem Betrieb über 35 h bei 0,3 Hz (95 mW) mit den Anteilen aus remanenter Schwindung und reversibler Systemerwärmung nach *Staab* [10]

Aus der Literatur ist bekannt, dass die Eigenschaften der hier verwendeten, mikrotechnisch strukturierten Werkstoffe von den Herstellungsparametern abhängen. Diese Abhängigkeiten gilt es zu untersuchen, um optimierte Werkstoffeigenschaften hinsichtlich der thermo-mechanisch zyklischen Belastung im Aktorbetrieb und damit einen guten Ausgangspunkt für beständige Mikroaktoren zu erhalten. Eine systematische Untersuchung der Betriebsgrenzen hinsichtlich der mechanischen und thermischen Belastbarkeit in Abhängigkeit der elektrischen Steuerleistung kann im Anschluß durchgeführt werden.

Eine weitere Forschungsfragestellung ergibt sich aus der Notwendigkeit, polymere Dehnungskörper über einen metallischen Leiter indirekt zu beheizen. Die Pseudobimorph-Aktoren in Abbildung 2.10 haben unterschiedliche, längs und quer verschleifte Mäandrierungen. Diese weisen ein konstantes Muster, also über den Verlauf des heißen Balkens unveränderte Größe und Form, auf. Durch das in Kapitel 6 dieser Arbeit entwickelte FEM-Modell wird die Inhomogenität der Temperaturverteilung deutlich. Sie ist in Abbildung 2.12 dargestellt. Durch die Anpassung des Heizermusters entlang des heißen Balkens ist eine Homogenisierung der Temperaturverteilung und damit eine deutliche Leistungssteigerung der Aktoren zu erwarten. Dies gilt es zu untersuchen.

Als Ausgangspunkt und „Referenzaktor“ wird der Pseudobimorph-Aktor von *Staab* mit quer verschleiftem Mäander und großem Balkenquerschnitt in dieser Arbeit zu Grunde gelegt.

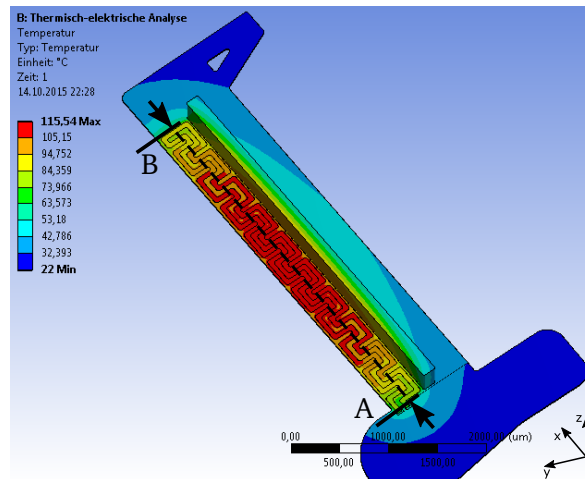


Abbildung 2.12.: Analyse des Pseudobimorph-Aktors von *Staab* mit Hilfe des in dieser Arbeit entwickelten FEM-Modells: Laterale Verteilung der Heizertemperatur

Zusammenfassend ergeben sich folgende Forschungsschwerpunkte:

- Optimierung der Werkstoffeigenschaften und Quantifizierung der Einsatzgrenzen von SU-8
Zunächst sind die kritischen Materialeigenschaften zu definieren und ihre Abhängigkeit von den Prozessparametern anhand der Literatur zu identifizieren. Daraus leiten sich Parametersätze für die eigenen Versuche ab. Ziel der Versuche ist ein optimaler Parametersatz für stark vernetztes SU-8 mit hoher Temperaturbelastbarkeit (Glasübergangstemperatur) und guten elastischen Eigenschaften.
- Optimierung der Werkstoffeigenschaften von galvanisch abgeschiedenem Nickel
Auch für galvanisches Nickel ist die Abhängigkeit der Werkstoffeigenschaften von den Prozessparametern zu ermitteln. Hierzu gibt es bereits Untersuchungen in der Literatur, die aufgearbeitet werden. Eigene Versuche werden zum spezifischen Widerstand nötig, dessen Abhängigkeit von der Herstellung quantifiziert wird. Ziel der Untersuchung ist ein optimierter Parametersatz für duktilen, mechanisch stabiles Nickel mit hohem spezifischen Widerstand.
- Steigerung der Leistungsfähigkeit indirekt geheizter Polymeraktoren
Mit Hilfe von FEM-Simulationen wird der gegebene Dehnungskörper des „Referenzaktors“ auf sein thermisches Leitfähigkeitsprofil hin analysiert und ein leistungsangepasster Heizer ausgelegt. Ziel des Vorgehens ist die Homogenisierung des Temperaturprofils in Längsrichtung und damit eine Leistungssteigerung der Aktoren. Hierfür ein neuartiges FEM-Modell notwendig, das die Geometrie des Heizers abbildet. Die innerhalb der vorigen Fragestellungen erarbeiteten Materialparameter fließen in das Modell ein.
- Charakterisierung unidirektional betriebener verbesserter Mikroaktoren
Die im Rahmen des vorigen Abschnitts erarbeiteten Aktorvarianten mit den optimierten Prozessparametern werden aufgebaut, charakterisiert und untereinander, sowie mit dem „Referenzaktor“ verglichen. Dabei wird das statische, dynamische, sowie das Langzeit- und Versagensverhalten (erreichte Zyklenzahl) der Aktoren in Abhängigkeit der Steuerleistung untersucht. Auf Basis der Ergebnisse werden die Methoden der Materialcharakterisierung aus den vorigen Kapiteln reflektiert, damit zur Eignungsprüfung neuer Werkstoffe auf umfangreiche Aktorcharakterisierungen verzichtet werden kann.

3 Technologische Randbedingungen und Prozessentwicklung

Die im vorigen Kapitel vorgestellten elektrothermischen Mikroaktoren aus SU-8 stehen im Fokus der vorliegenden Arbeit. Die Herstellung dieser Aktoren sowie die Untersuchung ihrer Komponenten und Werkstoffe erfordert eine Reihe von Herstellungsprozessen, die sich aus ihrem Schichtaufbau ableiten. In den folgenden Abschnitten werden daher die zur Aktorherstellung nötigen und am Institut EMK etablierten Herstellungsprozesse sowie die verfügbare Messtechnik zur Charakterisierung von Mikrostrukturen und elektrothermischen Mikroaktoren vorgestellt. Der zweite Teil des Kapitels widmet sich der Optimierung der vorhandenen Technologien durch eigene Prozessentwicklung.

3.1 Basistechnologien

Abbildung 3.1 zeigt den Schichtaufbau der Aktoren als Schema. Der Dehnungskörper aus SU-8 wird mittels UV-Tiefenlithographie hergestellt. An seiner Unterseite befindet sich ein galvanisch abgeformter Heizer aus Nickel. Als Startschicht für die Galvanoformung dienen durch PVD-Verfahren flächig aufgebrachte Metallschichten. Dehnungskörper und Heizer sind auf einem Substrat aus FR-4 verankert und lassen sich durch eine selektiv ätzbare Kupferopferschicht freistellen. Leiterbahnen und Pads zur Kontaktierung des Heizers werden durch eine zweite galvanische Abformung strukturiert.

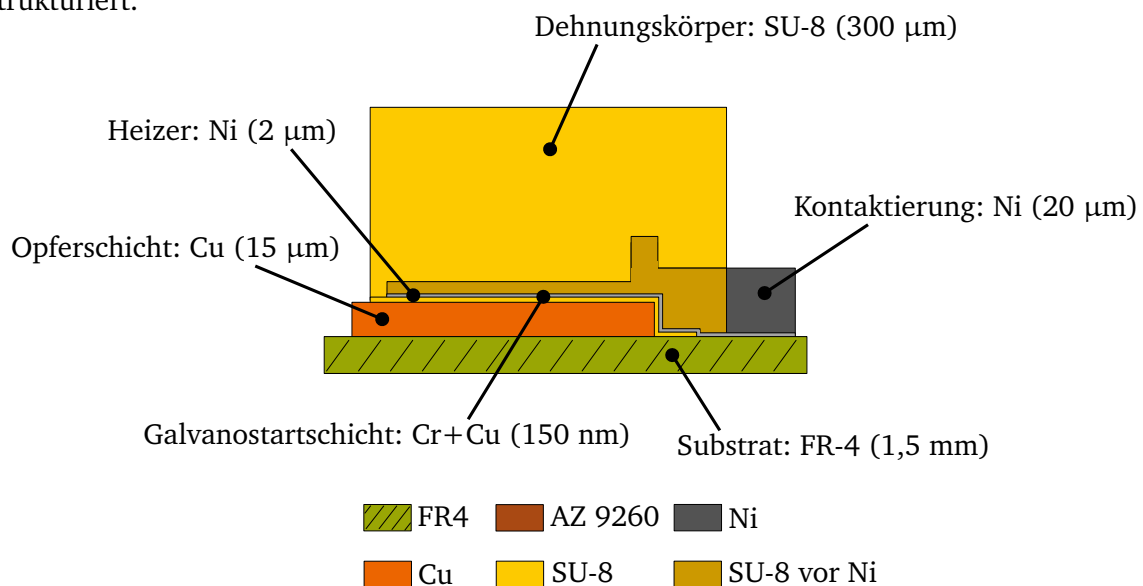


Abbildung 3.1.: Schematischer Schichtaufbau eines elektrothermischen Mikroaktors mit galvanisch abgeformtem Nickelheizer auf einem FR-4-Substrat

Alle Strukturen lassen sich durch additive Prozesse der Oberflächenmikromechanik herstellen. Im Wesentlichen kommen die UV-Tiefenlithographie, die Mikrogalvanoformung, die physikalische Gasphasenabscheidung, das Nassätzen und das Trockenätzen zum Einsatz. Außerdem werden kostengünstige Substratmaterialien alternativ zu Silizium verwendet. Alle benötigten Technologien stehen im hauseigenen Reinraumlabor des Institut EMK zur Verfügung und basieren auf den Arbeiten von *Eicher* [8], *Greiner* [47], *Staab* [10], *Schlosser* [48] und *Kohlstedt* [9].

Schwerpunkte der Prozessentwicklung sind dabei der Einsatz rauer Substrate in Kombination mit hohen Photoresistdicken $>30\text{ }\mu\text{m}$ und die Mikrogalvanoformung von Kupfer und Nickel. Auf die

Besonderheiten dieser Prozesse wird im Folgenden näher eingegangen. Die Grundlagen zur Lithographie, die Prozessschritte und -parameter von Nass- und Trockenätzen sowie der physikalischen Gasphasenabscheidung sind weitgehend der Grundlagenliteratur entnommen und werden in Anhang A ausführlich erläutert.

3.1.1 Alternative Substratmaterialien

Traditionell wird in der Mikromechanik monokristallines Silizium als Substratmaterial und zugleich Konstruktionswerkstoff eingesetzt [49], da es hervorragende mechanische Eigenschaften aufweist und für CMOS-Schaltungen direkt dotiert werden kann. In der Oberflächenmikromechanik dient das Substrat nur als Träger der Mikrosysteme, was alternative Materialien ins Spiel bringt.

Typische Anforderungen an Substratmaterialien sind die gute Haftung zu den Mikrostrukturen, gute Beständigkeit gegenüber aggressiven Chemikalien (bspw. Lösemittel oder Ätzmedien) und hohen Prozesstemperaturen, gute Reflektionseigenschaften besonders im UV-Bereich für die Lithographie und die optische Transparenz, bspw. für biologische Anwendungen. Dabei soll der Preis möglichst gering sein. Als Materialien kommen klassisches Silizium, Borofloat-Glas, Aluminiumoxidkeramik und das Platinenmaterial FR-4 in Frage. Tabelle 3.1 zeigt die Eigenschaften dieser Materialien hinsichtlich der Anforderungen.

Tabelle 3.1.: Eigenschaften von alternativen Substratmaterialien im Vergleich zu Silizium

Eigenschaft	Einheit	Silizium	Borofloat-Glas	Al ₂ O ₃ -Keramik	FR-4
Kosten (rund, 4-Zoll)	€	18,50	4,00	6,50	1,00
Mittlere Rauheit R_a	nm	~ 1	9	500	777
Max. Temperatur	°C	1417	1400	1700	200
Optische Transparenz	–	opak	transparent	opak	halbtransparent
Thermische Leitfähigkeit	W/mK	157	1,4	50	0,2
Therm. Ausdehnungskoeff.	10 ⁻⁶ /K	2,33	0,55	5,4	15
Dicke	µm	500	700	1000	1500

Bei den kostengünstigen Substraten gilt es, einige Besonderheiten zu beachten. Keramik und FR-4 weisen im Vergleich zu Silizium eine höhere Rauheit auf. Abbildung 3.2 zeigt die zugehörigen Oberflächenprofile, gemessen von *Staab*. Die Rauheit verbessert die Strukturhaftung deutlich, führt jedoch auch zu diffuser Reflektion von optischer Strahlung, was bei der Lithographie zu ungewollter seitlicher Belichtung der Strukturkanten und damit zu einem reduzierten Aspektverhältnis führt. Darüber hinaus sind durch den materialabhängigen Grad der UV-Reflektion unterschiedliche Kantenprofile nach der Belichtung zu erwarten und verschiedene Belichtungs Dosen notwendig.

Besonders für das Backen von Photoresisten auf FR-4-Wafern muss die geringe thermische Leitfähigkeit beachtet werden. *Staab* zeigt, dass an Platinenmaterial von 1,5 mm Dicke ein Temperaturabfall von ~10 °C auftritt. Dies ist beim Programmieren der Heizplatte zu berücksichtigen, um die erforderliche Lacktemperatur zu erhalten. Auch andere Prozessparameter, bspw. die Belichtungs-dosis, werden durch die Wahl des Substratmaterials beeinflusst.

In dieser Arbeit wird überwiegend Platinenmaterial FR-4 eingesetzt, da es bei geringem Preis sehr gute Haftungseigenschaften aufweist. Des Weiteren lässt sich die flächig vorhandene Kupferkasschiebung von 15 µm Dicke direkt als Opferschicht für freitragende Strukturen nutzen.

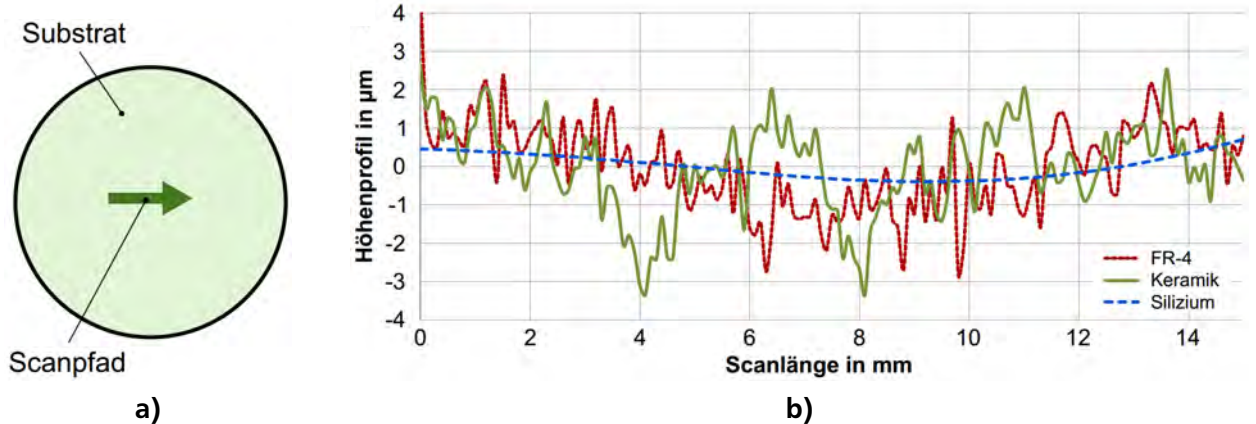


Abbildung 3.2.: Oberflächenprofile von Substratmaterialien nach *Staab* [10]: a) Schematische Substratdarstellung mit eingezeichnetem Scanpfad ; b) Diagramm mit drei Höhenprofilen (FR-4, Keramik und Silizium) über die Länge des Scanpfads

3.1.2 UV-Tiefenlithographie

Mit Hilfe der Photolithographie werden Strukturen in einem strahlungsempfindlichen Lack (Photoresist), mit dem das zu strukturierende Substrat beschichtet ist, erzeugt. Der zunächst flüssige Lack wird in der gewünschten Dicke auf das Substrat aufgebracht und im Softbake getrocknet. Die Bestrahlung mit UV-Licht aktiviert den Photoinitiator des Resists und verändert die Löslichkeit, wobei durch photochemische Prozesse im Resist die Löslichkeit der belichteten Bereiche im Fall von Positivresist erhöht wird und im Fall von Negativresist verringert wird. Die löslichen Bereiche werden in einem Entwicklerbad nasschemisch entfernt. Abbildung 3.3 zeigt die typischen Schritte einer lithographischen Strukturierung. In dieser Arbeit wird die UV-Lithographie mit drei Lacksystemen für verschiedene Einsatzgebiete genutzt.

Nachfolgend werden besondere Prozessschritte beim Einsatz rauer Substrate näher betrachtet und anschließend die verwendeten Lacksysteme mit Prozessparametern vorgestellt. Die Diskussion der vollständigen Lithographie-Prozesskette befindet sich in Anhang A.

Belacken

Zu Beginn der Prozessierung wird der Lack in definierter Menge auf das Substrat dispensiert. Für Zielschichtdicken bis max. 100 µm wird der Lack **aufgeschleudert**: Durch schnelle Rotation des Wafers stellt sich eine zur Drehzahl proportionale Lackdicke ein.

Für hohe Schichtdicken wird ein **Gießprozess** nach *Staab* verwendet: Die Zielschichtdicke wird über die dispensierte Lackmenge eingestellt. Durch manuelles Kippen, Schwenken und Verstreichen wird das Substrat flächig mit Lack benetzt. Ein nachfolgender Backschritt für eine Stunde bei ca. 60 °C unter Lösemittelatmosphäre lässt den Lack fließen und durch die Oberflächenspannung stellt sich eine homogene Lackdicke ein. *Staab* weist eine Schwankung der Schichtdicke um 15 % auf einem 4"-Substrat nach. Die Vorteile des Gießprozesses liegen in der Materialersparnis, das kein überschüssiger Lack abgeschleudert wird und in der Möglichkeit, vorstrukturierte Wafer mit großer Oberflächentopologie belacken zu können. An Strukturkanten treten beim Aufschleudern Lackabrisse auf, die eine flächige Bedeckung verhindern. Wird die Zielschichtdicke größer als die unterliegende Topologie gewählt, lassen sich auch stark vorstrukturierte Substrate belacken.

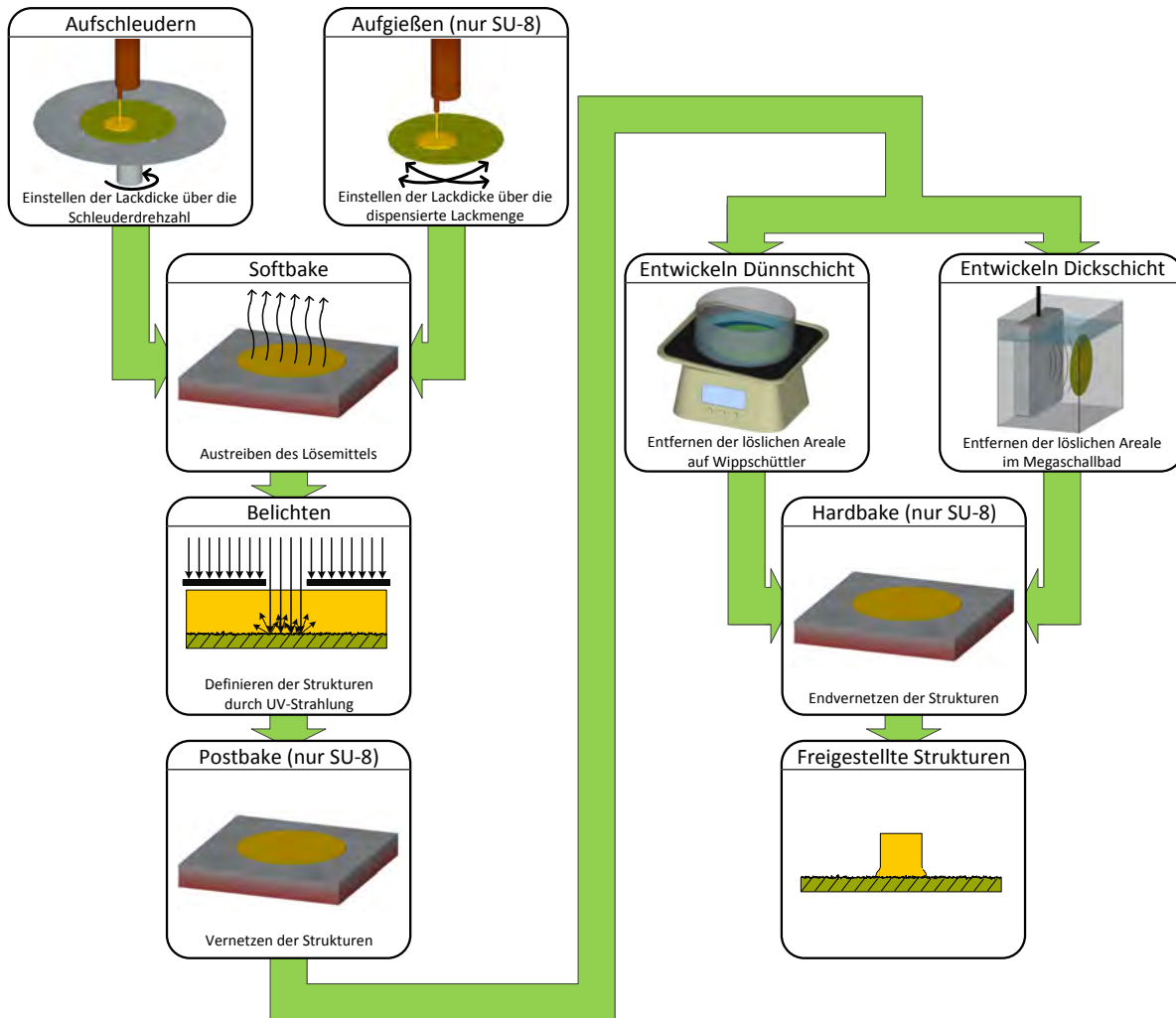


Abbildung 3.3.: Prozessschritte der UV-Lithographie

Belichten

Zur Definition der Mikrostrukturen wird eine Schattenmaske, die die lateralen Strukturdimensionen trägt, über dem Substrat justiert und für eine definierte Zeit einer hochparallelen UV-Strahlung ausgesetzt. So wird die Struktur der Maske in den Lack übertragen. Hierfür steht ein Mask Aligner vom Typ SÜSS MA-56 M mit einer Quecksilberdampfampe und verschiedenen Kantenfiltern zur Verfügung. Unterschiedliche Lacksysteme sind für ausgewählte Peaks besonders geeignet, weshalb das Spektrum über vorhandene Kantenfilter beschnitten werden kann. Die Belichtungsintensitäten und Spektren betragen $22,8 \text{ mW/cm}^2$ für ghi-line, $10,0 \text{ mW/cm}^2$ für gh-line und $7,2 \text{ mW/cm}^2$ für i-line. Die Homogenität der Belichtung über die Waferfläche beträgt ca. $\pm 10 \%$. Mit dem Lampenalter können die absoluten und spektralen Intensitäten schwanken, weshalb diese in regelmäßigen Abständen zu prüfen ist.

Zur Vermeidung von Beugungseffekten an den Maskenkanten, die zur Reduzierung der lateralen Auflösung führen, wird die Kontaktbelichtung eingesetzt, bei der die Maske auf die Resistschicht aufgepresst wird. Da, bedingt durch die rauen Substrate, nur Strukturauflösungen bis in den unteren zweistelligen μm -Bereich möglich sind, bieten sich einige kostengünstige Maskenmaterialien als Alternativen zu den teuren Chrommasken an (siehe Tabelle 3.2). Diese Polymerfilme werden an Glasträger angeheftet und in den Belichter eingesetzt. Abhängig von der gewünschten Strukturauflösung wird die Maske gewählt und die Belichtungszeit entsprechend der Transmission angepasst.

In dieser Arbeit kommen überwiegend Emulsionsfilme vom Typ HI zum Einsatz, da die kleinsten Strukturabmessungen 20 µm betragen.

Tabelle 3.2.: Eigenschaften von Materialien für Lithographiemasken

Eigenschaft	Einheit	Emulsionsfilm Luxel	Emulsionsfilm HI	Chromplatte
Trägermaterial	–	PET-Folie	PET-Folie	Soda Lime Glas
Dicke	mm	0,1	0,18	3
Transmissionsfaktor	%	86,6	85,6	89,7
Auflösung	dpi	3658	bis 100.000	bis 200.000
Kleinste Strukturweite	µm	30 ±20	20 ±4	3 ±1
Preis	–	Günstig	Mittel	Hoch

Bei der Belichtung gilt es zu beachten, dass ein gutes Ergebnis (klar aufgelöste, senkrechte Strukturanten) von der korrekt gewählten Belichtungs-dosis abhängen. Diese Dosis gilt es in Abhängigkeit des Lacksystems, der Lackdicke, der Reflektions-, sowie der Streueigenschaften der unterliegenden Schichten experimentell zu bestimmen. Ausgangspunkte liefern die Angaben in den Datenblättern der Photolacke. Die Dosis wird dann über Belichtungsreihen und eine meist optische Prüfung der Strukturqualität ermittelt.

Entwickeln

Die Belichtung teilt die Lackschicht in Areale von hoher und niedriger chemischer Löslichkeit auf. Im Falle des epoxidbasierten UV-Negativresists SU-8 muss die chemische Stabilität nach der Belichtung durch einen Post-Exposure-Bake (Postbake) weiter gesteigert werden. Dies ist für die übrigen Lacksysteme in der Regel nicht der Fall. Die löslichen Areale werden in einem zum Lacksystem passenden Entwicklerbad entfernt.

Bei dicken Schichten kommt vor allem in dünnen Gräben das Entwicklerbad zum Ruhen und wird durch das Schwenken allein nicht mehr ausgetauscht. Die Entwicklung findet durch reine Diffusion statt. Gerade in den Gräben ist eine vollständige Entwicklung aber meist für die Funktion der Schicht entscheidend. Die Entwicklung wird daher durch den Einsatz einer Sonosys Megaschallquelle mechanisch unterstützt. Durch die Anregung des Bades mit einer mechanischen Schwingung von 1 MHz entstehen Flüssigkeitswirbel in Gräben mit einer Breite >0,6 µm [50], was die mechanische Abfuhr von verbrauchtem Entwickler wieder ermöglicht.

Verwendete Lacksysteme und Prozessparameter

Im Rahmen dieser Arbeit kommen drei Lacksysteme zum Einsatz:

- Der Positivresist AZ® 9260 der Microchemicals GmbH ist ein sehr robuster Allround-Lack für Schichtdicken von 2...30 µm, der sich auf allen verfügbaren Substraten für das Nassätzen und als Galvanoform eignet [51]. Der Resist basiert auf dem Novolak-Harz, das in PGMEA gelöst ist, und zeichnet sich durch große Prozessfenster und eine lange Haltbarkeit prozessierter Schichten aus. Die mit ghi-line belichteten Bereiche werden in dem basischen Entwickler AZ400K gelöst (Verdünnung von 3:1 bis 4:1). Das Strippen des Lacks erfolgt durch Auflösen und Abspülen mit Aceton. Tabelle 3.3 zeigt die Prozessparameter für 30 µm Lackdicke.
- Der Photolack AZ® 125nXT der Microchemicals GmbH ist ein Negativresist auf Acryl-Polymer-Basis, der sich für Schichtdicken von 10...400 µm eignet [52]. Die Acryl-Monomere

vernetzen im UV-Bereich bei Wellenlängen von 380...440 nm direkt und sind ausreichend stabil, so dass als Galvanoform für Schichtdicken >50 µm verwenden lässt. Die Belichtung wird mit der gh-line vorgenommen, die Entwicklung erfolgt in dem wasserbasierten Entwickler AZ® MIF 326. Zur Entfernung können der Stripper Dimethylsulfoxid (DMSO), ein Acetonbad oder das Veraschen im Plasma verwendet werden [53]. In dieser Arbeit wird der Lack mit 150 µm Dicke eingesetzt. Tabelle 3.3 zeigt die zugehörigen Prozessparameter.

- Der epoxidbasierte UV-Negativresist EPON SU-8 ist ein mechanisch und thermisch hochstabil, weil bei hohen Prozesstemperaturen quervernetztes Material, das sich als Funktions- und Konstruktionswerkstoff eignet [54]. Nach der Initiation der Vernetzung durch Belichtung mit dem i-line-Spektrum ist ein vernetzender Postbake nötig, um die nötige Stabilität zur Entwicklung der Strukturen mit dem Lösemittel Propylen Glycol Methyl Ether Acetat (PGMEA) zu erreichen. In einem abschließenden Hardbake wird eine sehr starke Vernetzung erreicht. Auf den Werkstoff und die Abhängigkeit seiner Eigenschaften von der Prozessierung wird in Kapitel 4 ausführlich eingegangen, die Prozessierung basiert jedoch auf den Ergebnissen von Staab für SU-8 in den Dicken 20 µm und 300 µm. Tabelle 3.3 zeigt die Prozessparameter.

Tabelle 3.3.: Parameter der Standardprozesse für die Photolacke AZ® 9260, AZ® 125nXT und SU-8 auf rauen Substraten

Schritt	Parameter	Einheit	AZ® 9260	AZ® 125nXT	SU-8	
Belacken	Zieldicke	µm	30	150	20	300
	Lackmenge	ml	3,0	4,0	4,0	3,9
	Verfahren	–	Schleudern	Schleudern	Schleudern	Gießen
	Drehzahl	rpm	1500	1100	3500	–
Softbake	Einebnen (abgedeckt)	°C	95	135	95	60
		min	5	10	5	60
	Trocknen	°C	95	135	95	95
		min	35	15	55	540
	Abkühlen	min	0	60	0	60
Belichten	Dosis	J/cm ²	~3	~7	~0,4	~6
	Spektrum	–	ghi-line	gh-line	i-line	i-line
Postbake	Aufheizen	min	–	–	30	30
	Halten	°C	–	–	75	95
		min	–	–	30	30
	Abkühlen	min	–	–	30	30
Entwickeln	Medium Zeit	– min	AZ®400K ~20	AZ®MIF 326 ~10	PGMEA ~10	PGMEA ~30
Hardbake	Aufheizen	°C	–	–	140	150
		–	–	–	30 min	24 h
	Halten	min	–	–	30	–
	Abkühlen	–	–	–	30 min	24 h
Aspektverhältnis Säule		–	1:1 $\frac{2}{3}$	–	1:2	4:1
Aspektverhältnis Graben		–	3:1	–	1:3	2 $\frac{2}{3}$:1

3.1.3 Mikrogalvanoformung

Für die definierte Metallisierung von Mikrosystemen mit lateral hochaufgelösten Strukturen kommt die Mikrogalvanoformung zum Einsatz. Lateral begrenzt, bspw. durch die lithographische Strukturierung eines Photoresists, reduzieren Metallionen aus der flüssigen Phase an einer leitfähigen Kathode und bilden eine Metallschicht. Am Institut EMK werden Kupfer und Nickel in Schichtdicken von 2...400 µm eingesetzt. Nickel eignet sich aufgrund seiner hohen Elastizität als Konstruktionswerkstoff [55], kann durch seine elektrischen und magnetischen Eigenschaften aber auch als Heizleiter, Sensorelement oder Flussführung [10] eingesetzt werden. Kupfer lässt sich sehr leicht und in hoher Selektivität zu anderen Metallen ätzen und wird für Opferschichten [8] verwendet.

Bei der galvanostatischen Abscheidung wird ein konstanter Strom zwischen der Materialquelle an der Anode und dem Substrat an der Kathode angelegt, wodurch ein permanenter Ionenstrom im Elektrolytbad entsteht. Die Schichtdicke bestimmt sich durch die transportierte Ladungsmenge, und damit bei konstantem Strom über die Abscheidezeit. An der Grenzschicht zwischen Elektrolyt und Kathode kommt es zu Verarmungseffekten, welche zu Fehlstellen in der Metallschicht oder Nebenreaktionen führen können. In lateraler Richtung ist das Schichtwachstum proportional zur Stromdichteverteilung. An den Kanten der Galvanoform kommt es zu einer Feldüberhöhung, die proportional zur Größe des angrenzenden passivierten Gebiets ist, und zu einer entsprechenden Schichtdickenüberhöhung am Strukturrand. Abbildung 3.4 zeigt eine typische galvanisch abgeformte Struktur mit ca. 300 µm Schichtdicke mit der charakteristischen Randüberhöhung, grober Schichttextur und ungewollter Blasenbildung durch eine zu hoch gewählte Stromdichte.

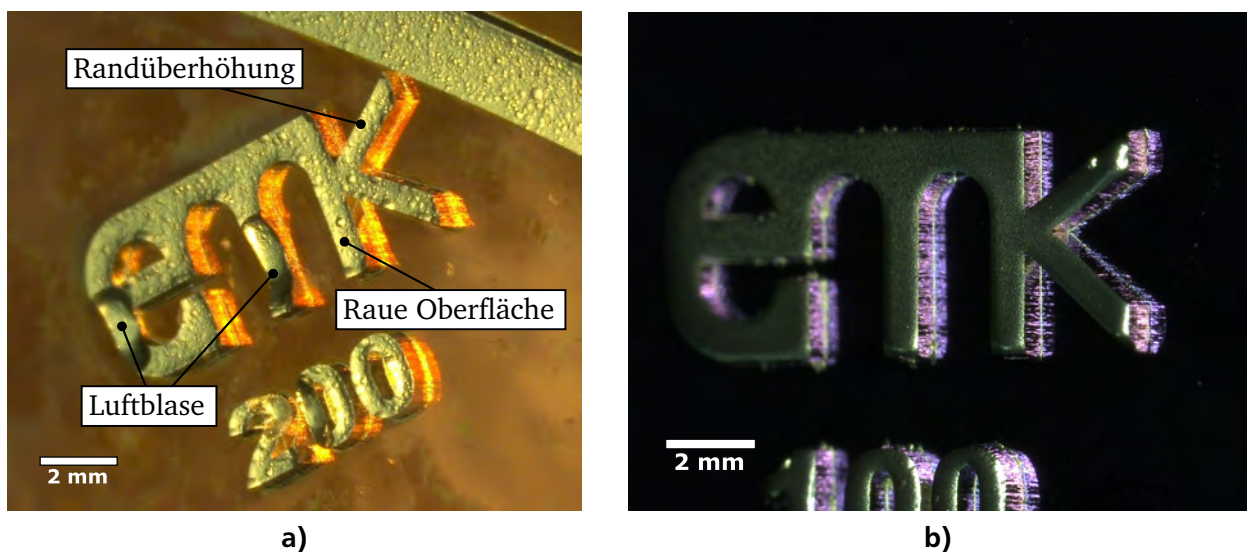


Abbildung 3.4.: Foto typischer Galvanostrukturen aus 300 µm Nickel: a) Schlechte Schichtqualität mit Blasenbildung, grober Textur und charakteristischer Randüberhöhung durch zu hohe Stromdichten; b) Gute Schichtqualität ohne Blasen und mit feinkörniger Textur

Mikrogalvanikanlage M-O-T µGalv

Am Institut EMK steht eine Mikrogalvanikanlage vom Typ M-O-T µGalv mit zwei getrennten Galvanikzellen für 4-Zoll-Substrate zur Verfügung. In den Zellen befinden sich ein Nickelsulfamat- und ein schwefelsaures Kupferbad zur Abscheidung von Nickel- und Kupferschichten. Abbildung

3.5a) zeigt eine schematische Darstellung des Elektrolytkreislaufs. Im Ausgleichsbehälter befinden sich ca. 25 l Elektrolyt, der auf bis zu 60 °C temperiert werden kann. Der Elektrolyt wird über eine Pumpe durch einen Partikelfilter, zur Entfernung von Feststoffen bis 1 µm Durchmesser, hin zur Prozesszelle gefördert und strömt dort die Probe an. In der Prozesszelle ist ein Anodenkorb mit Ausgangsmaterial parallel zum rotierend aufgehängten Substrat an der Kathode angebracht. Eine Feldblende bündelt das Stromdichtefeld während der Abscheidung auf das Substrat hin. Die Nickelzelle verfügt zusätzlich über eine pH-Wert-Regelung durch Nachdosierung einer Amidoschwefelsäure-Lösung und einen Aktivkohlefilter zum Entfernen organischer Rückstände. Die an dieser Anlage einstellbaren Prozessparameter sind die Badtemperatur, die Durchflussgeschwindigkeit der Probenanströmung, die Rotationsgeschwindigkeit der Kathode und im Fall der Nickelzelle der pH-Wert.

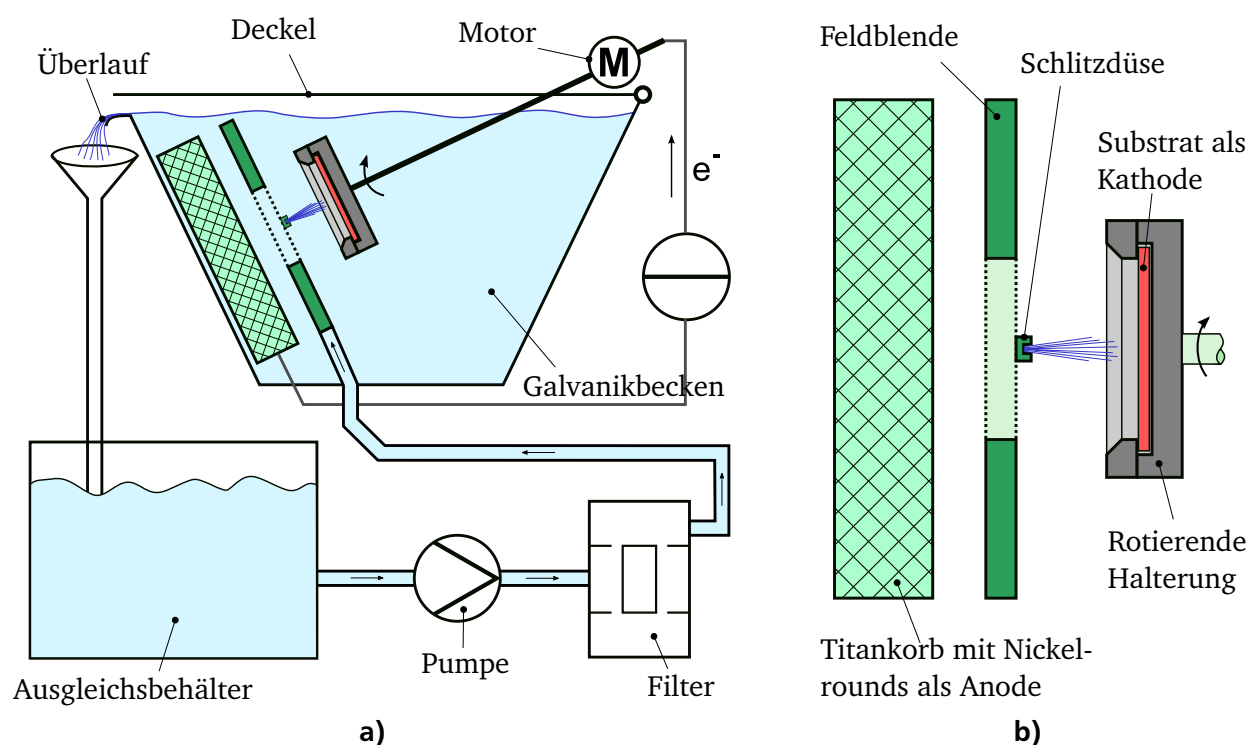


Abbildung 3.5.: Schema der am Institut EMK vorhandenen Mikrogalvanikanlage M-O-T µGal nach Staab [10]: a) Elektrolytkreislauf über Ausgleichsbehälter mit Temperierung, Pumpe und Filtertopf mit Aktivkohle- und Partikelfilter in die Elektrolysezelle. Über den Überlauf fließt der Elektrolyt zurück in den Ausgleichsbehälter; b) vergrößerte Ansicht des Galvanikbeckens mit Titankorb und Füllung aus schwefeldepolarisierten Nickelrounds (Anode), einer Feldblende mit aufgesetzter Schlitzdüse zur senkrechten Substratanströmung und der rotierenden Waferhalterung (Kathode)

Zusatzfreie wartungsarme Elektrolyte

Zur Verbesserung der Schichtqualitäten wird in der Galvanotechnik häufig mit Badzusätzen, bspw. mit benetzender oder glanzbildender Wirkung, gearbeitet. Die Zusatzkonzentrationen müssen konstant gehalten werden, was bei Kleinstanlagen durch Neuansetzen des Elektrolyts und in der Massenproduktion durch Regelung oder permanente Titration gewährleistet werden kann. Beides ist kosten- und zeitintensiv. Da die Strukturen nicht für dekorative Zwecke, sondern als Funktions- und Konstruktionselemente eingesetzt werden, ist Glanz nicht erforderlich. Auch die Benetzung

des unterliegenden Substrats kann bspw. durch eine Vorbehandlung im Sauerstoffplasma erzielt werden. Daher ist es möglich, vollständig zusatzfreie Elektrolyte einzusetzen.

Nickelsulfamatelektrolyt

Nickel eignet sich aufgrund seiner guten mechanischen, elektrischen und magnetischen Eigenschaften als Konstruktions- und Funktionswerkstoff für Mikrosysteme. Zur galvanischen Abformung von Nickel stehen verschiedene Badansätze, bspw. Sulfat-, Chlorid oder Nickelsulfamatbäder, zur Verfügung [56]. *Wohlgemuth* wählt einen Sulfamatelektrolyten, der für hohe Stromdichten geeignet ist und im Vergleich mit anderen Ansätzen die geringsten mechanischen Spannungen im Material hervorbringt [55]. Tabelle 3.4 zeigt die Bereiche von Badzusammensetzung (innere Prozessparameter) und Abscheideparametern (äußere Prozessparameter) mit den typischen Werten. Die inneren Parameter sind hinsichtlich geringer intrinsischer Spannungen und damit guter Strukturhaftung nach *Hammond* gewählt [57]. In Kapitel 5 werden die Eigenschaften von Nickelschichten für Mikrosysteme und ihren Abhängigkeiten von den äußeren Prozessparametern ausführlich diskutiert.

Tabelle 3.4.: Bereiche von inneren und äußeren Galvanikparametern des Nickelsulfamatelektrolyten nach *Wohlgemuth* [55] und aktuell verwendete Werte

Innere Prozessparameter			
Parameter	Einheit	Wertebereich	aktuelle Einstellung
Nickelsulfamat	g/l	200...600	275
Nickelchlorid	g/l	0...30	0
Borsäure	g/l	30...45	35
pH-Wert	–	3,5...4,5	4,0
Äußere Prozessparameter			
Temperatur	°C	20...60	45
Kathodenrotation	rpm	0...42	7,5
Anströmung	l/min	1...12	4
Stromdichte	A/dm ²	1...32	2

Schwefelsaurer Kupferelektrolyt

Zur Abscheidung von Kupferschichten kommt ein schwefelsaurer Kupferelektrolyt zum Einsatz. Dieser Elektrolyt kann zusatzfrei verwendet werden, lässt durch hohe Stromdichten große Abscheideraten bei vernachlässigbaren intrinsischen Spannungen zu und erzeugt feingranulare, matte Schichten, die sich gut nassätzen lassen [56]. Das Bad wird bei Raumtemperatur betrieben und Bedarf keiner pH-Wert-Regelung oder anderen Nachdosierungen. Zu beachten gilt es, dass der Elektrolyt durch die Schwefelsäure ohne äußeren Stromfluss Kupferätzt, weshalb Galvanostartschichten und die abgeschiedene Schicht selbst angegriffen werden. Daher gilt es, die Probe unmittelbar nach der Abscheidung aus dem Elektrolyt zu entfernen und zu reinigen. Tabelle 3.5 zeigt die Bereiche von Badzusammensetzung und Abscheideparametern, sowie typische Werte nach *Jelinek* und *Staab*.

3.2 Elektromechanische und thermische Messtechnik

Zur Charakterisierung von Mikrosystemen und speziell der elektrothermischen Mikroaktoren kommen drei Messsysteme zum Einsatz. Der am Institut EMK entwickelte Motion-Analyzer bestromt die Mikroaktoren und erfasst die In-Plane Auslenkung. Out-of-Plane-Messungen sind auf einem

Tabelle 3.5.: Bereiche von inneren und äußeren Galvanikparametern bei schwefelsauren Kupfer-elektrolyten nach *Jelinek* [56] und *Staab* [10] sowie aktuell verwendete Werte

Innere Prozessparameter			
Parameter	Einheit	Wertebereich	aktuelle Einstellung
Kupfersulfat (Pentahydrat)	g/l	150...250	150
Kupfer	g/l	38...64	38
Schwefelsäure	g/l	30...230	220
Chlorid	mg/l	30...150	46
Äußere Prozessparameter			
Temperatur	°C	20...45	30
Kathodenrotation	rpm	0...42	3,75
Anströmung	l/min	1...12	2
Stromdichte	A/dm ²	1...20	2

Messplatz mit Konfokalmikroskop und Spannungsquelle möglich. Eine kommerzielle Infrarotkamera vom Typ FLIR SC655 erlaubt das Messen von Oberflächentemperaturen und kann flexibel an den elektromechanischen Messplätzen angebracht werden. Die Messsysteme werden nachfolgend vorgestellt.

3.2.1 Statische und dynamische In-Plane-Messung mittels Motion-Analyzer

Der so genannte Motion-Analyzer ist ein von *Staab* [10] und *Eicher* [8] entwickeltes automatisiertes Messsystem zum Einprägen von Strömen in einen elektrothermischen Mikroaktor und dem optischen Erfassen seiner statischen und dynamischen Auslenkung. Dies geschieht in der Ebene durch Mustererkennung mit einer CCD-Kamera. Durch eine Vierpunktmessung sind die Momentanwerte der Aktorspannung und damit die Leistungsaufnahme und der elektrische Widerstand bestimmbar. Die nachfolgende Beschreibung des Messsystems orientiert sich an den oben genannten Arbeiten. Abbildung 3.6 zeigt den prinzipiellen Aufbau des Messplatzes.

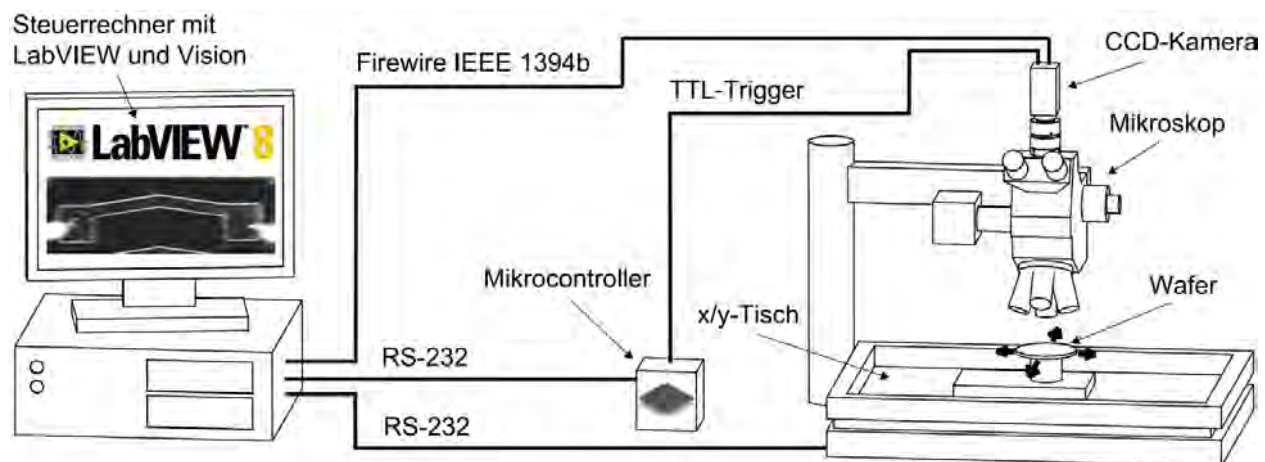


Abbildung 3.6.: Automatisierter Messplatz zur statischen und dynamischen Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften von Mikroaktoren: Optische Wegmessung über ein Kamerasystem nach *Staab* [10]

Ein Wafer-Prober vom Typ 2001X von Electroglas stellt die Grundlage des Messplatzes mit einer im μm -Bereich positionierbaren Probenaufnahme und einem coaxialen Aufrichtmikroskop dar. Über Objektive mit 2-, 5- und 10-facher Vergrößerung und eine CCD-Kamera vom Typ Allied Vision Technologies F-421B mit 2048×2048 Pixel lassen sich Aktorbewegungen auf einem Messfeld bis $11,7 \text{ mm}^2$ optisch erfassen und mittels Erkennung eines Musters auswerten. Hierunter versteht sich ein Bildausschnitt mit eindeutiger Kontur, dessen Position durch Kreuzkorrelation in Folgebildern bestimmt wird. Definiert man das Muster an der Stelle der größten Aktorbewegung und erfasst seine Verschiebung bei Bestromung des Mikroaktors, ergibt sich bei korrekter Objektiveinstellung und Kalibrierung des Messplatzes die Leerlaufauslenkung. Dieses Verfahren kommt für die statische und dynamische Erfassung der Auslenkung zum Einsatz. Zur dynamischen Messung muss das Nyquisttheorem eingehalten werden [58]. Durch die mit 15 fps begrenzte Abtastrate der Kamera wird daher für Aktorfrequenzen $>7,5 \text{ Hz}$ eine Unterabtastung eingesetzt. Dies ist nur für harmonische Aktoranregungen möglich und basiert auf der Annahme, dass sich im Zeitfenster der Messwertaufnahme das Aktorverhalten nicht ändert. Die in dieser Arbeit durchgeführten Messungen nutzen dieses Prinzip nicht, da die Aktoren mit $300 \mu\text{m}$ Dicke besonders für Langzeituntersuchungen mit $0,1 \text{ Hz}$ betrieben werden. Die Ansteuerung der Einzelgeräte und die Mustererkennung erfolgen durch einen Steuerrechner mit LabView[®] 8 und Vision. Tabelle 3.6 zeigt die wichtigsten Kenndaten des Messsystems.

Tabelle 3.6.: Kennwerte des am Institut EMK vorhandenen Motion-Analyzers für die Wegmessung nach Staab [10]

Wegmessung	Einheit	Wert		
Vergrößerung	–	2	5	10
Messfeld	mm^2	$11,7 \times 11,7$	$4,7 \times 4,7$	$2,3 \times 2,3$
Optische Auflösung	$\mu\text{m}/\text{Pixel}$	5,72	2,31	1,15
Relativer Fehler	%	0,2		
Wiederholgenauigkeit	nm	≤ 30		
Frequenzbereich	Hz	0,0035 - 11500		

Als Messprogramme kommen das Aufnehmen der statischen Kennlinie und die zerstörende Prüfung durch Dauerbetrieb des Mikroaktors mit Rechteckanregung durch einen Strom zum Einsatz. Die statische Kennlinie bestimmt sich als Funktion der stetig erhöhten elektrischen Leistung, berechnet aus dem eingepprägten Strom und der gemessenen Spannung, und der gemessenen Verschiebung der Aktorspitze. In dieser Arbeit wird die bestehende Messvorschrift geändert zu einer Anregung des Prüflings mit Stromstufen von definierter Dauer und darauf folgender Abkühlpause von gleicher Länge. So lässt sich neben der Auslenkung auch die Verschiebung der Ruhelage des Aktors für jede Leistungsstufe bestimmen.

Ebenfalls in dieser Arbeit wird die Messvorschrift „Zerstörende Prüfung“ ergänzt. Sie erlaubt das Aufprägen eines Rechteckstroms mit Frequenzen von minimal $0,1 \text{ Hz}$ für einen definierten Zeitraum, gefolgt von einer definierten Pause. Optional kann der Strom nach der Pause um einen festen Betrag erhöht werden. In festen Zeitabständen werden die Leerlaufauslenkung und die Verschiebung der Nulllage erfasst. Die Messung endet mit der Zerstörung des Prüflings. Mit diesem Messprogramm lässt sich entweder die Obergrenze des Aktorbetriebs, oder die Anzahl der Betriebszyklen bis zur Zerstörung des Aktors experimentell ermitteln.

3.2.2 Statische Out-of-Plane-Messung

Für die Charakterisierung von Aktoren mit Bewegungsrichtung aus der Fertigungsebene heraus steht ein Messplatz ohne automatisierte Messprogramme zur Verfügung. Auf einem schwingungs-gedämpften Portalaufbau der Firma Cyber Technologies ist ein Konfokalsensor vom Typ $\mu\epsilon$ IFS 2405-3 angebracht, der einen Arbeitsabstand von 20 mm und einen Messbereich von 3 mm bei einer Auflösung von 36 nm aufweist. Messwerte werden mit einer Abtastrate von 1 kHz aufgenommen [59]. Die Messdaten werden per LAN-Verbindung übertragen und auf dem Steuerrechner als Wertepaar aus Systemzeit und Höhendifferenz angezeigt. So lässt sich die statische Auslenkung einer Aktorgeometrie bei fester Ansteuerleistung ablesen. Durch Verwendung der frei verfügbaren Screen-Capture-Software WebMcam [60] mit einer Bildrate von 25 fps lässt sich auch das zeitliche Aktorverhalten aufzeichnen und die Sprungantwort bestimmen. In eigenen Vorversuchen werden Schichtdickenmessungen an SU-8-Balken, einem optisch halbtransparenten Material, mit den Messergebnissen des Oberflächenprofilometers VEECO Dektak 8 verglichen. Die Messwerte unterscheiden sich um wenige μm , was einer Verkipfung der Probe zuzuschreiben ist.

Die Ansteuerung der Aktoren erfolgt über eine Spannungsquelle mit in Reihe geschalteter Strommessung angesteuert. Dafür kommen das Voltmeter HM8143 mit einer Maximalspannung von 30 V je Kanal bei einer Stellgenauigkeit von 0,1 V [61], und das Digitalmultimeter HM8011-3 mit einem Messbereich bis 200 mA und einer Auflösung von 10 μA zum Einsatz [62]. Der Aktor selbst wird, analog zum oben vorgestellten Motion-Analyzer, über zwei Wafer-Prober kontaktiert. Der Kontaktwiderstand ergibt sich zu wenigen Ω und kann ohne nennenswerte Beeinträchtigung der Ansteuerungsgenauigkeit vernachlässigt werden. Da im Rahmen dieser Arbeit die ersten Out-of-Plane(OoP)-Aktoren entstehen, genügt dieser provisorische Messplatz für eine erste Charakterisierung der neuen Antriebe.

3.2.3 Temperaturmessung mittels Thermographie

Die Oberflächentemperaturen der Mikroaktoren werden mittels Thermographie mit der Wärmebildkamera FLIR SC655 bestimmt [63]. Der Mikroaktor strahlt über seine Oberfläche als grauer Strahler elektromagnetische Strahlung ab, die sich nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz als Emission eines Wärmestroms modellieren lässt. Dabei wird der Wärmestrom mit dem materialabhängigen Emissionsgrad $0 < \epsilon(T, \lambda) < 1$ gewichtet. Mit der Boltzmann-Konstante $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ ergibt sich Gleichung 3.1.

$$\dot{Q}_{\text{rad}} = \epsilon(T, \lambda) \sigma A T^4 \quad (3.1)$$

Die Thermokamera arbeitet nach dem bolometrischen Prinzip: Die Sensorelemente bestehen aus stark temperaturempfindlichen elektrischen Widerständen, deren Betrag sich in Abhängigkeit der absorbierten Wärmestrahlung ändert. Die daraus resultierenden Spannungsänderungen an den Sensorelementen werden ausgewertet. Die Elemente messen in einem Spektrum von 7,5...13 μm , was innerhalb des für irdische Temperaturen relevanten Bereichs des mittleren Infrarot mit Wellenlängen von 3...50 μm liegt. Die reflektierte Umgebungsstrahlung und die Eigenstrahlung der Thermokamera müssen daher bei der Messung berücksichtigt werden, sind bei dem kommerziellen Gerät aber bereits durch Kalibration kompensiert [64]. Die Kamera FLIR SC655 erfasst 640 x 480 Pixel bei einer maximalen Abtastrate von 15 fps. Temperaturen von -50...650 $^{\circ}\text{C}$ sind auf zwei Messbereichen bei einer vom Hersteller angegebenen Messgenauigkeit von $\pm 2^{\circ}\text{C}$ messbar.

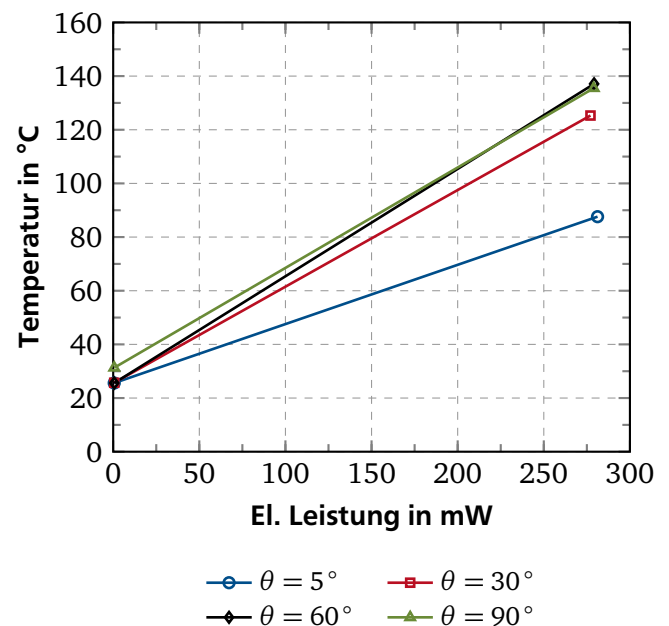
Der Emissionsgrad ϵ kann auf dem hier betrachteten Spektrum als unabhängig von der Temperatur angenommen werden [64]. Kubenz *et. al.* [65] ermitteln den Emissionsgrad für SU-8 mit

Dicken 150...1000 μm zu 0,95. Dies entspricht typischen Werten von Kunststoffen und wird für die folgenden Messungen angenommen.

Bei der Wärmestrahlung handelt es sich um einen Oberflächeneffekt. Unabhängig von der optischen Transparenz der SU-8-Strukturen wird bei der Thermographie die Temperatur der Oberfläche bestimmt. In Abbildung 3.7a) ist die in dieser Arbeit verwendete Messanordnung dargestellt. Die gemessene Temperatur hängt vom Anstellwinkel der Kamera zum Messobjekt ab. Abbildung 3.7b) zeigt die gemessenen Temperaturen einer mit den elektrischen Leistungen 0,6 und 280 mW beaufschlagten metallischen Streifenprobe auf einem Polymerträger. Für große Anstellwinkel von 60...90 ° werden Temperaturen von 137 °C gemessen, für flachere Winkel <30 ° ist ein zunehmender Messfehler zu beobachten. Daher wird ein Anstellwinkel von 60 ° nicht unterschritten. Außerdem kann eine unzureichende Fokussierung des Kameraobjektivs auf das Messobjekt zu erheblichen Messfehlern führen.



a)



b)

Abbildung 3.7.: Anordnung zur Temperaturmessung während des Aktorbetriebs: a) Motion-Analyzer mit Thermokamera FLIR SC655; b) Abhängigkeit von Temperaturmesswert und Winkel zwischen Messobjekt und Kamera: Gemessene Temperatur einer metallischen Streifenprobe auf einem Polymersubstrat bei Raumtemperatur und 280 mW für verschiedene Winkel

3.3 Optimierung vorhandener Prozesse

Die in Kapitel 3.1 vorgestellten Basistechnologien wurden im Laufe der vorliegenden Arbeit optimiert und erweitert. Im Folgenden werden die Optimierung der Galvanoformen für Leiterbahnbreiten von 20 μm , die Fertigung von PVD-Leiterbahnen mit einer Breite von 20 μm , die Sprühbelackung von Substraten mit hoher Topologie und die Herstellung mehrlagiger SU-8-Strukturen durch Auflaminieren des Trockenlamiants SU-EX vorgestellt. Außerdem wird auf die feinwerktechnische Strukturierung von Substratmaterialien eingegangen. Diese neuen Prozesse bilden, zusammen mit den Basistechnologien, den Rahmen für die in dieser Arbeit hergestellten Mikrosysteme und Proben.

3.3.1 Galvanisch abgeformte Leiterbahnen mit 20 μm Breite

Die kleinsten Strukturen auf rauen Substraten, die mit den in Kapitel 3.1.2 hergestellt werden, haben eine Weite von 50 μm . Diese minimale Strukturweite limitiert den Spielraum für die laterale Gestaltung des Heizers und sollte durch Prozessoptimierung auf 20 μm gesenkt werden.

Als Gavanoform kommt der Photolack AZ® 9260 zum Einsatz. Begrenzender Faktor für die Strukturweite ist die Lackdicke von 30 μm in Kombination mit der diffusen Reflektion bei der Belichtung auf rauen Substraten. Daher wird die Lackdicke auf 10 μm reduziert und die nachfolgenden Prozessparameter angepasst. Die Versuche werden auf vorstrukturierten FR-4-Substraten mit lokaler Kupferkaschierung und wahlweise zusätzlich 20 μm strukturierter SU-8-Schicht durchgeführt. Da sich die Lackdicke entgegengesetzt zur Schleuderdrehzahl verhält, wird diese schrittweise erhöht, der Lack getrocknet und durch Quadrantenbelichtung unterschiedliche Belichtungs Dosen eingebracht. Nach dem Entwickeln wird die Schicht mit dem Oberflächenprofilometer auf ihre Dicke und Strukturtreue geprüft.

Das beste Ergebnis zeigt sich bei einer Drehzahl von 1500 rpm und einer Belichtungs dosis von 1,6 J/cm². Es ergibt sich eine Lackdicke von 12 μm und eine zuverlässige Grabenbreite von 20 μm . Die Softbakezeit reduziert sich auf 15 min bei 95 °C. Abbildung 3.8 zeigt mit dem neuen Prozess gefertigte Galvanoformen auf Kupfer und SU-8.

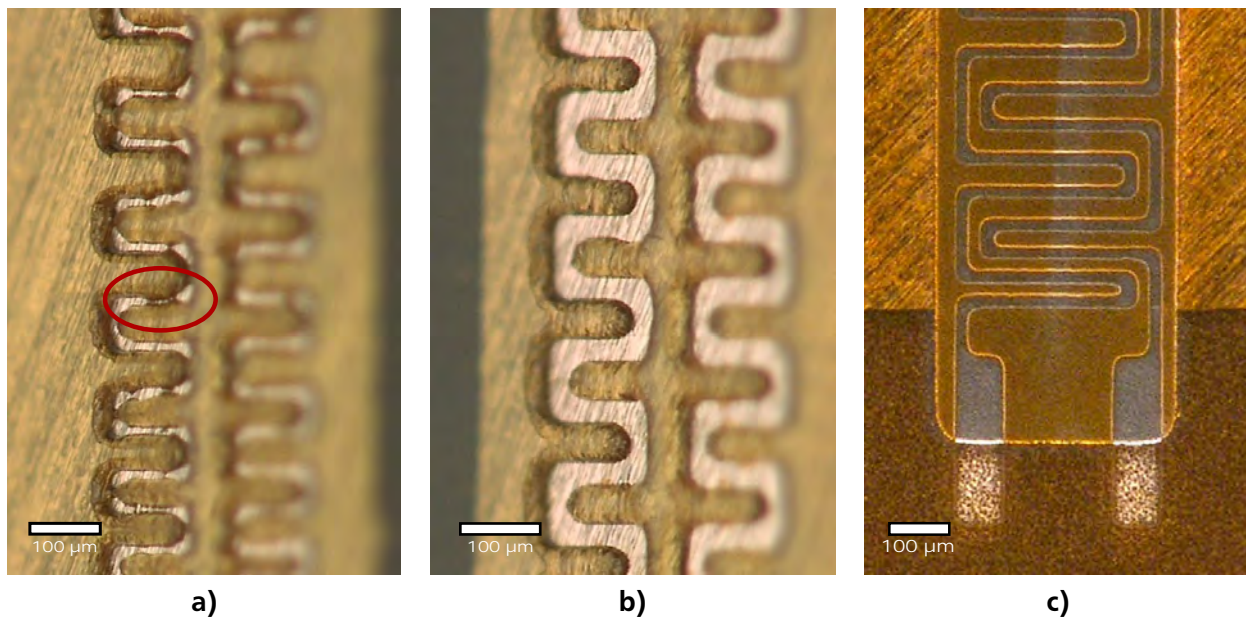
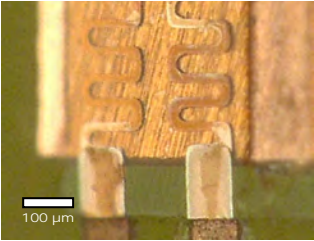
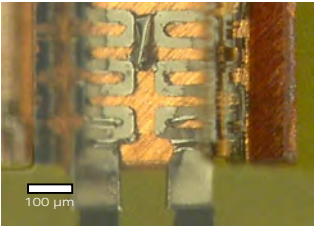
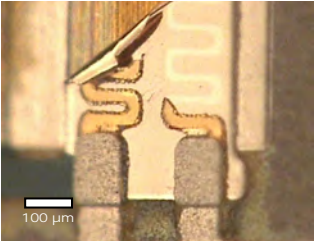
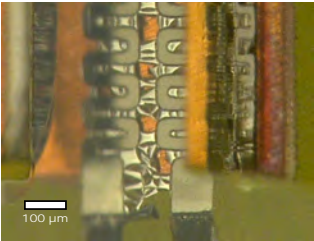
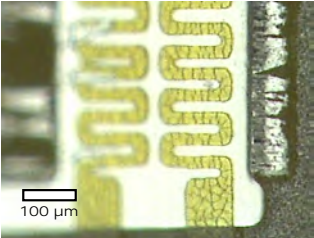


Abbildung 3.8.: Galvanoformen mit 10 μm AZ® 9260 und 20 μm Grabenbreite: a) Unsaubere Gräben auf 15 μm Kupfer nach zu geringer Belichtungs dosis; b) Erfolgreich prozessierte Strukturen auf 15 μm Kupfer; c) Erfolgreich prozessierte Strukturen mit langen parallelen Gräben auf 15 μm Kupfer und 20 μm SU-8

3.3.2 Dünnschicht-Leiterbahnen mit 20 µm Breite

Die Arbeit von *Staab* zeigt, dass sich PVD-Schichten mit wenigen 100 nm Dicke besser für mändrierte Heizer eignen, als galvanische Schichten mit ca. 2 µm [10]. Da nun ein Lithographieprozess für Leiterbahnen mit 20 µm Breite verfügbar ist, gilt es, diesen für die Strukturierung von PVD-Schichten einzusetzen.

Tabelle 3.7.: Fertigungsvarianten zur Herstellung von PVD-Leiterbahnen mit 20 µm Breite

Beschichtung	Strukturierung	Ergebnis	Ausfallgrund
Sputtern: 200 nm Cr, 100 nm Cu	Nassätzen: APDS, TechniStrip Cr01		Unterätzungen wegen schlechter Lackhaftung
Sputtern: 200 nm Cr, 100 nm Cu	Lift-Off: Aceton		Lift-Off nicht vollständig wegen Kantenbedeckung
Sputtern: 100 nm Al, 100 nm Cu	Nassätzen: APDS, Aluätze		Schlechte Lackhaftung, Hohe Schichtspannungen (Al)
Bedampfen: 20 nm Cr, 150 nm Ni	Lift-Off: Aceton		Lift-Off nicht vollständig wegen Kantenbedeckung
Bedampfen: 20 nm Cr, 150 nm Ni	Nassätzen: Königswasser		Ni-Ätze nicht selektiv, ätzt ausschließlich Cu

Die Metallisierung durch PVD-Verfahren erfolgt konform über das ganze Substrat. Zur Strukturierung der Schicht kommen daher Nassätzen oder Lift-Off in Frage [66]. Beim Nassätzen werden die gewollten Areale nach der Beschichtung durch eine Photolackschicht abgedeckt und die offenen Areale entfernt. Für den Lift-Off werden die ungewollten Areale durch Photolack abgedeckt, beschichtet und die Schicht durch Strippen des Lacks aufgebrochen und abgespült. Kommt für

die Metallisierung das Sputtern zum Einsatz, gilt es die verfahrensbedingte Kantenbedeckung zu berücksichtigen. Die senkrechte Metallschicht an den Lackkanten kann nach dem Strippen zurückbleiben, undefiniert umfallen und Kurzschlüsse erzeugen.

Tabelle 3.7 zeigt die untersuchten Metallschicht- und Verfahrensvarianten. Die Versuche werden auf vorstrukturierten FR-4-Substraten mit lokaler Kupferkaschierung und 20 µm strukturiertem SU-8 durchgeführt. Die ersten beiden Varianten benutzen Kupfer als Lithographiemaske für das unterliegende Chrom, das als Heizer dient. Hohe Eigenspannungen, daraus folgende Haftungsprobleme oder mangelnde Selektivität der Ätzmedien (Königswasser ätzt Kupfer vor Nickel) verhindern eine zuverlässige Strukturierung der Schichten durch Nassätzen. Für den Lift-Off erweist sich, unabhängig vom gewählten PVD-Verfahren, die Lackdicke als zu gering, es kommt überwiegend zu Kurzschlüssen.

Die Prozessierung von PVD-Schichten zu Leiterbahnen mit 20 µm Breite schlägt mit den verfügbaren Technologien fehl. Daher werden diese Strukturen im weiteren Verlauf der Arbeit durch Galvanoformung hergestellt.

3.3.3 Belacken von Substraten mit hoher Oberflächentopologie

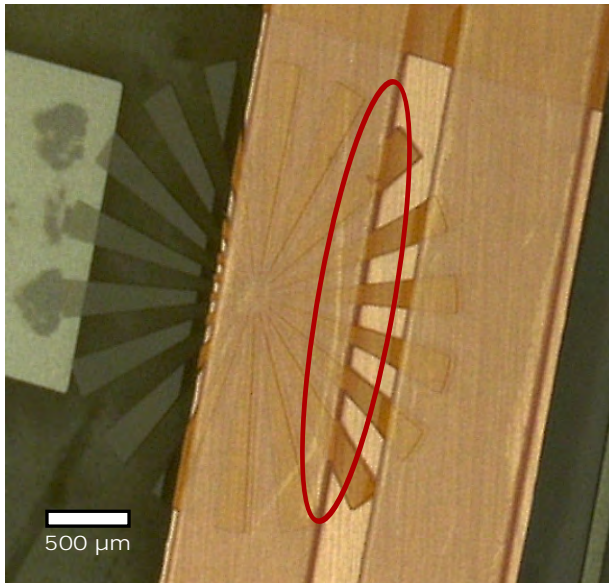
In Kapitel 3.1.2 wird das Belacken von Substraten mit Oberflächentopologie erläutert: Eine Lack-schicht mit größerer Dicke als die vorhandene Topologie wird aufgegossen. Bei hohen Topologien kann diese sehr hohe Lackdicken zur Folge haben und zu langen Prozesszeiten sowie verringerter Strukturauflösung führen.

Eine Alternative bietet die Sprühbelackung, bei der ein langsam rotierendes Substrat konform mit einem verdünnten Photolack besprüht wird. Hierzu ist ein manueller Prozess zu entwickeln. Der bereits etablierte Resist AZ® 9260 kann als Sprühlack verwendet werden [67]. Der Lack basiert auf dem Lösemittel PGMEA und lässt sich mit Aceton verdünnen [51]. Durch die stark unterschiedlichen Verdunstungszahlen (PGMEA: 33 [68]; Aceton: 2 [69]) evaporiert das Aceton beim Verlassen der Sprühpistole vollständig und auf dem Substrat bleibt der ursprüngliche Photolack zurück.

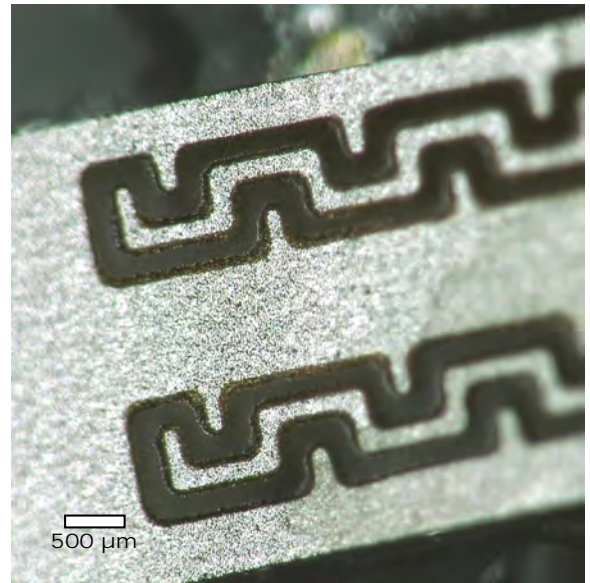
Eigene Versuche werden mit dem empfohlenen Gemisch von gleichen Teilen AZ® 9260 und Ace-ton auf einer Lackschleuder bei geringer Drehzahl von 100 rpm durchgeführt. Vorstrukturierte FR-4-Substrate mit einer Topologie aus lokaler Kupferkaschierung und 60 µm SU-8, sowie struktu-rierte SUEX-Lamine von 300 µm Dicke werden mit unterschiedlichen Lackmengen besprüht und die Schichtdicke mit dem Oberflächenprofilometer bestimmt. Tabelle 3.8 zeigt die Ergebnisse für 0,5...3 ml Sprühlack und Schichtdicken bis 30 µm. Die Angaben sind Richtwerte, da besonders bei großer Topologie oder nach unten geöffneten Laminatschichten unterschiedliche Lackmengen auf den Strukturen verbleiben.

Tabelle 3.8.: Lackmengen und resultierende Schichtdicken für die Sprühbelackung

Lackmenge in ml	Schichtdicke in µm
0,5	~7
1	5...11
2	10...17
3	23...28
4	25...30



a)



b)

Abbildung 3.9.: Durch Sprühbelackung aufgebraute, strukturierte Lackschichten: a) Gute Kantenbedeckung von 30 µm AZ® 9260 auf 60 µm SU-8 und FR-4-Substrat mit 15 µm Kupferkaschierung; b) Homogene und erfolgreich strukturierte Schicht von 20 µm AZ® 9260 auf freigestelltem, metallisiertem SUEX mit 300 µm Dicke

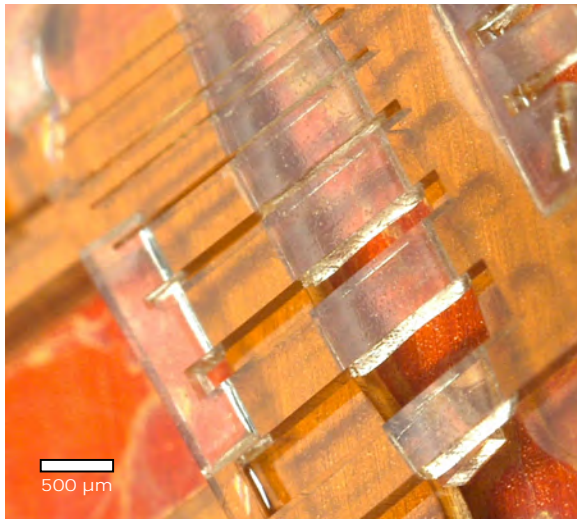
Abbildung 3.9a) zeigt die konforme Belackung eines strukturierten FR-4-Substrats, ein sprühbelacktes SUEX-Laminat ist in Abbildung 3.9b) zu sehen.

3.3.4 Mehrlagige SU-8-Strukturen durch Laminieren von SUEX

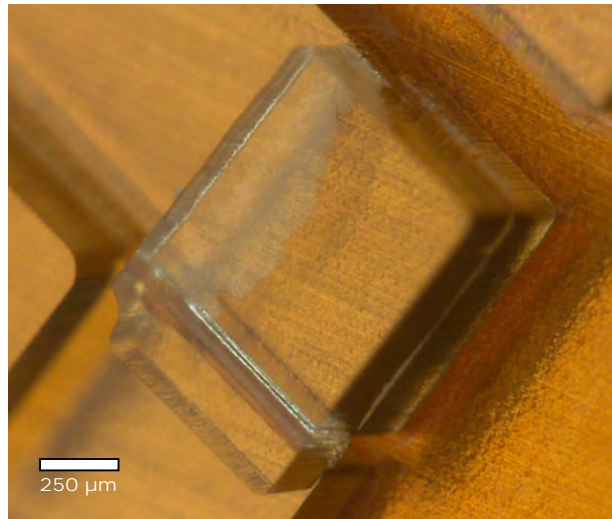
Im Jahre 2010 stellen *Johnson et. al.* die Trockenlaminatvariante von SU-8, genannt SUEX, vor [70, 71]. Diese Lamine sind in 4"-Zuschnitten mit einer beidseitigen Polyesterkaschierung von 50 µm Dicke erhältlich. Analog zu getrockneten SU-8-Schichten erweicht SUEX ab ca. 60 °C und zeigt eine Klebwirkung, die *Johnson* für das Laminieren mehrerer SUEX-Lagen und die anschließende lithographische Strukturierung zu Mikrokanälen nutzt [72].

Unter „Laminieren“ versteht man das stoffschlüssige, thermische Fügen ohne Hilfsmaterialien [73]. Hierzu steht ein kommerzielles Laminiergerät vom Typ GBC 3500 Pro mit Temperaturen bis 150 °C und Vorschubgeschwindigkeiten von 3...9 mm/s zur Verfügung. Dabei ist die Anpresskraft durch die Laminierwalzen sehr hoch, was das erweichende SUEX vollständig in die Strukturen und Gräben des vorstrukturierten Substrats drückt. Um definierte Strukturen zu erhalten, werden Höhenabstandshalter in Form von Metallstreifen in Vorschubrichtung angebracht, die eine um ca. 50 µm geringere Höhe, als der zu laminierende Schichtstapel haben. So pressen sich die Schichten definiert ineinander.

In Versuchen auf vorstrukturierten FR-4-Substraten mit vorstrukturierten Kupfer- und SU-8-Schichten werden die beiden prozessbestimmenden Parameter Vorschubgeschwindigkeit und Temperatur variiert. Mit der Vorschubgeschwindigkeit von 3 mm/s bei einer Temperatur von 70 °C haftet das Laminat flächig an und drückt sich nur um 20 ± 9 µm in die unterliegenden SU-8-Strukturen [74]. Das Laminat kann nun direkt belichtet werden. Dabei ist zu beachten, dass die obere Polyesterkaschierung auf der Laminierschicht verbleibt, da sonst im folgenden Postbake ein Fließen



a)



b)

Abbildung 3.10.: Zweilagige Teststrukturen aus je 300 µm strukturiertem SU-8 und SU-EX-Laminat; a) Testgräben mit ansteigenden Aspektverhältnisse bis 7:1; b) Großflächige Teststruktur mit kaum sichtbarem Ineinanderpressen von ca. 20 µm

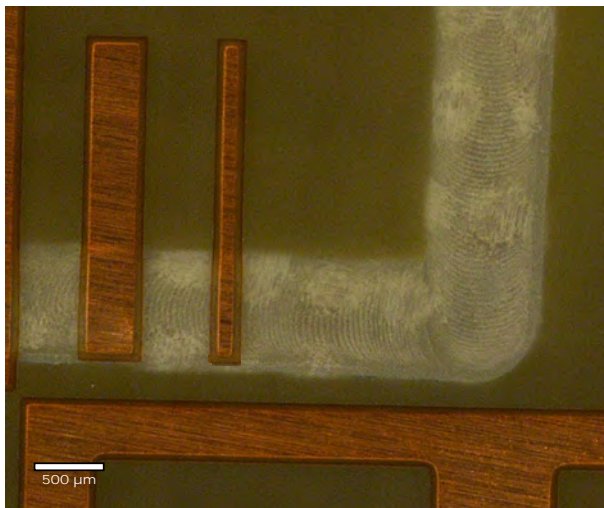
und damit eine Verzerrung der belichteten Strukturen auftritt. Die Kaschierung beeinträchtigt die Strukturtreue bei der Belichtung nicht.

Abbildung 3.10a) zeigt eine zweilagige Teststruktur aus je 300 µm strukturiertem SU-8 und SU-EX-Laminat. Die obere Lage ist mit Testgräben von ansteigendem Aspektverhältnis strukturiert. Es zeigt sich die hohe erreichte Strukturgüte mit einem maximalen Aspektverhältnis von 7:1, ähnlich zur Literatur [75]. Abbildung 3.10b) zeigt das kaum sichtbare Ineinanderpressen anhand einer größeren überlappenden Struktur. In der Arbeit von *el Khoury* zeigt sich, dass die so hergestellte Laminierverbindung Scherspannungen bis 32 MPa aufnehmen kann und damit zur Herstellung elektrothermischer Mikroaktoren geeignet ist [74].

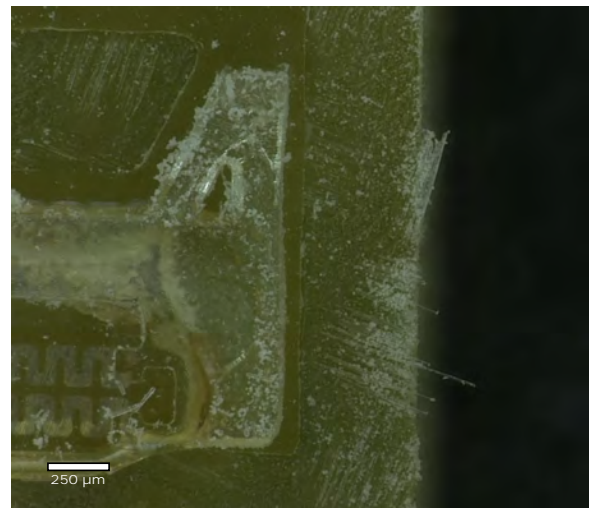
3.3.5 Substratstrukturierung durch Fräsen

Auf der vorhandenen CNC-Fräse vom Typ Datron M10pro+ lassen sich Schnitte mit minimalem Werkzeugdurchmesser von 0,1 mm bei lateraler und horizontaler Positioniergenauigkeit von ± 5 µm fertigen. Dies eröffnet die Möglichkeit, das in dieser Arbeit hauptsächlich benutzte FR-4-Substrat rückseitig bis auf 50 µm Restdicke anzufräsen, und so Sollbruchstellen zur Entfernung des Substrats vorzusehen. Das Substrat wird dabei vorderseitig nicht beschädigt, der Fräsgraben prägt sich um 10...30 µm durch die Substratoberfläche ein. So können alle Prozesse der Oberflächenmikromechanik unverändert durchgeführt werden. Abbildung 3.11a) zeigt die Draufsicht auf einen rückseitig gefrästen Graben.

Ebenso ist es möglich, dank der hohen Positioniergenauigkeit, die Substrate nach erfolgter Mikrosystemfertigung zu fräsen und so mit frei definierbarem Footprint zu vereinzeln. Da nur geringe Spannbildung auftritt, werden die Mikrosysteme nicht abgerissen und bleiben unbeschädigt. Abbildung 3.11b) zeigt freitragende elektrothermische Mikroaktoren aus SU-8 an einer Schnittkante zur Öffnung des Substrats.



a)



b)

Abbildung 3.11.: Substratstrukturierung durch Fräsen: a) Draufsicht auf ein rückseitig angefräster Wafer mit in die Substratebene gewölbtem Fräsgraben; b) Nach der Mikrosystemfertigung gefrästes Substrat mit freigestellten elektrothermischen Mikroaktoren



4 Einsatzgrenzen von SU-8 für elektrothermische Mikroaktoren

Im Rahmen dieser Arbeit kommt der epoxidbasierte UV-Negativresist SU-8 als Konstruktionswerkstoff für die elektrothermischen Mikroaktoren zum Einsatz. SU-8 ist seit der Mitte der 1990er Jahre als Werkstoff in der Mikrosystemtechnik verbreitet. Mit seinem weiten Schichtdickenbereich zwischen 2 μm [76] und 3 mm [77] bei sehr guter Kantensteilheit und Aspektverhältnissen bis 56:1 [78] wird es für Applikationen von der Galvanoform [79], zur Konstruktion [80] oder Abformung [81] von Mikrokanälen, als bewegliche Elektrode von elektrostatischen Aktoren [82], bis hin zu elektrothermischen Mikroaktoren [8] eingesetzt. Abbildung 4.1a) zeigt beispielhaft Mikrosäulen mit hohem Aspektverhältnis nach *Liu* [78].

Dabei werden stets die unter den UV-Resisten herausragende Eignung als Konstruktionswerkstoff [83, 84] betont. Grund ist die gute mechanische und thermische Beständigkeit aufgrund des hohen Quervernetzungsgrad der Polymermatrix. Dennoch beobachtet *Staab* [10] plastische Verformungen und ein Einlaufverhalten der elektrothermischen Mikroaktoren aus SU-8. *Feng et. al.* [85] zeigen, dass die Eigenschaften von SU-8, besonders hinsichtlich des Vernetzungsgrades und der Glas temperatur, von den Prozessparametern abhängen. Da der Werkstoff im Einsatz als thermischer Aktor einer besonderen thermo-mechanisch-zyklischen Belastung unterliegt und dies in der Literatur nicht ausreichend untersucht ist, sind für diese Arbeit eigene Untersuchungen nötig.

Im Folgenden werden die Grundlagen zu SU-8, die Prozessparameter und ihr Einfluss auf die Werkstoffeigenschaften diskutiert und die eigenen Versuche zu Vernetzungsgrad, Glas temperatur und der Schwindung vorgestellt. Am Schluss dieses Kapitels steht ein optimierter Satz von Prozessparametern.

4.1 Grundlagen zu SU-8

Der Negativresist SU-8 wurde im Jahre 1989 von IBM patentiert [86] und wird seit 1995 als Werkstoff für MEMS eingesetzt [87]. Im Folgenden werden seine Zusammensetzung und Eigenschaften vorgestellt.

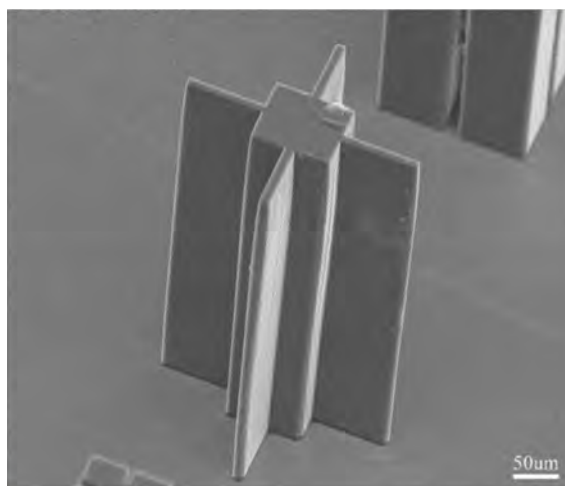
4.1.1 Zusammensetzung

Das Material SU-8 ist im Urzustand flüssig und besteht aus drei Grundbausteinen:

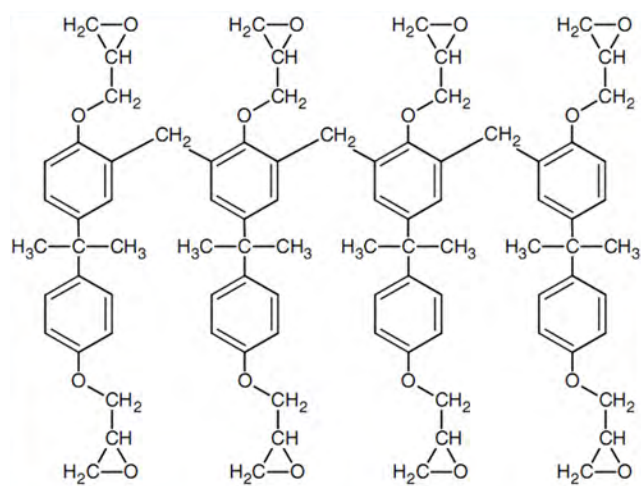
- Epoxidharz-Monomer: Bisphenol-A-Novolak von Shell Chemical (Feststoffanteil 63 %)
- Organisches Lösemittel: γ -Butyrolacton, ab Generation 2000 mit Cyclopentanon [88] (Feststoffanteil 32 %)
- Photoinitiator: Triarylsulfoniumsalz (Feststoffanteil 5 %)

Abbildung 4.1b) zeigt die Molekülstruktur des Epoxidharz-Monomers mit seinen namensgebenden acht Epoxidgruppen. Durch diese hohe Gruppenfunktionalität ist es in organischen Lösemitteln bis zu einem Feststoffanteil von 85 % löslich und erreicht im polymerisierten Zustand eine starke räumliche Vernetzung.

Nach der Verfestigung der Lackschicht durch Austreiben des Lösemittels im Softbake wird der Photoinitiator durch Belichten der Schicht mit UV-Strahlung bei 350 nm aktiviert. Er zerfällt durch Photolyse in eine Lewis-Säure, die als Protonendonator zur Öffnung der Epoxid-Ringe dient. Damit



a)



b)

Abbildung 4.1.: Negativresist EPON SU-8: a) Mikrosäulen mit hohem Aspektverhältnis nach Liu [78]; b) Molekülstruktur mit acht Epoxy-Ringen

wird die Vernetzungsreaktion in Gang gesetzt. Die Säure wirkt katalytisch, verbraucht sich also im Laufe der Reaktion nicht. Durch einen angeschlossenen so genannten Postbake findet durch eine wärmeinduzierte Polyaddition der SU-8-Monomere eine erste Vernetzung der Strukturen statt, die im Anschluss die Entfernung der nicht belichteten Lackgebiete ermöglicht. Benötigt man besonders beständige Strukturen, kann in einem abschließenden Hardbake die Glasstemperatur des Werkstoffs bis hin zu 238 °C [85] erhöht werden.

SU-8 wird von der MicroChem Corporation kommerziell vertrieben. Da mit dem ursprünglich verwendeten Lösemittel γ -Butyrolacton Haftungsprobleme auf metallischen Schichten auftreten, ist seit 2003 die Generation SU-8 2000 auf Basis von Cyclopentanone erhältlich. Eine weitere Verbesserung hinsichtlich reduzierten Schichtspannungen und besserer Haftung stellt SU-8 3000 dar, bei dem das Grundmonomer modifiziert ist und Zusätze verwendet werden. In dieser Arbeit wird ausschließlich SU-8 2025 eingesetzt, das sich auf Grund seiner geringen Viskosität gut aufgießen lässt.

4.1.2 Eigenschaften von SU-8

Die typischen Eigenschaften von SU-8 sind in der Literatur für stark unterschiedliche Prozessparameter untersucht und werden im Folgenden, angelehnt an *del Campo* [89], wiedergegeben.

Das unvernetzte, getrocknete SU-8 erweicht ab ca. 60 °C ohne Schaden zu nehmen und kann zum Einebnen welliger Schichten oder zum Strukturieren durch Heißprägen aufgeschmolzen werden. Vernetztes SU-8 hat als Duroplast glasartige Eigenschaften mit sprödem Bruchverhalten und sehr geringen viskoelastischen Eigenschaften. Unter Temperatureinfluss verändert der Werkstoff seine Eigenschaften kaum, bis zum Erreichen des Glasübergangsbereichs (je nach Prozessierung 150 bis 238 °C), ab dem es seine amorphe Struktur verliert. Bei 380 °C tritt Verkohlung auf. Vernetzte Strukturen lassen sich nur schwer entfernen. In einem Reaktivradikalverascher, z.B. vom Typ R3T Muegge STP 2020, ist unter Einsatz von Sauerstoff und Tetrafluormethan das Entfernen durch Trockenätzen möglich.

SU-8 ist mit einem Kontaktwinkel von 73 °C hydrophob und benetzt anorganische Stoffe nur schlecht. Dies reduziert seine Eignung als Galvanoform, durch eine Aktivierung im Sauerstoffplasma kann die Benetzung jedoch stark verbessert werden. Die Haftung zu metallischen Substraten ist

stark materialabhängig und wird von *Nordstöm* untersucht [90]. Zugtests zeigen, dass die Haftung auf Titan oder Titanoxid am besten, die Haftung auf Nickel am schlechtesten ist. Daher eignen sich Haftvermittler wie OmniCoat von MicroChem oder TI Prime von MiroChemicals sehr gut für SU-8. Trotz der hydrophoben Eigenschaften zeigt *Wouters*, dass SU-8 Flüssigkeit aufnimmt und quillt. Dies geschieht am stärksten mit dem Lösemittel PGMEA und Isopropanol, aber auch bei Wasser [91]. Im DI-Wasserbad baut sich innerhalb von 70 s eine Dehnung von 0,3 % auf.

Erste Charakterisierungen der mechanischen Eigenschaften von SU-8 werden von *Lorenz et. al.* im Jahre 1997 durchgeführt [92, 93] und bis heute, beispielsweise von *Robin et. al.* [76] ergänzt. Tabelle 4.1 zeigt die mechanischen Eigenschaften von SU-8, die in der Literatur typischerweise verwendet werden.

Tabelle 4.1.: Typische mechanische Eigenschaften von SU-8 aus der Literatur nach *Teh et. al.* [94]

Eigenschaft	Einheit	Wert
E-Modul nach Postbake mit 95 °C	GPa	4,02
E-Modul nach Hardbake mit 200 °C	GPa	4,95±0,42
Biaxialer E-Modul $E/(1 - \nu)$	GPa	5,18±0,89
Schichtspannung nach Postbake mit 95 °C	MPa	16...19
Maximale Schichtspannung nach Hardbake mit 200 °C	MPa	34
Reibungskoeffizient nach Postbake mit 95 °C	–	0,19
Glasübergangstemperatur nach Softbake	°C	~50
Maximale Glasübergangstemperatur	°C	238
Pyrolysetemperatur	°C	380
Thermischer Ausdehnungskoeffizient nach Postbake mit 95 °C	10 ⁻⁶ /K	52±5,1
Schwindung nach Vernetzung	%	7,5

Mit einem Brechungsindex zwischen 1,56 und 1,7 [95] und einem Dämpfungsfaktor bis zu 0,5 dB/cm wird SU-8 auch für Wellenleiter eingesetzt [96]. Mit einer relativen Permittivität von 4 [97] und einer Durchbruchfeldstärke von 1,1 10⁵ V/m ist es ebenfalls für dielektrische oder elektrostatische Anwendungen geeignet. Auch die Biokompatibilität des Werkstoffs ist gegeben, was *Voskerician et. al.* nachweisen [98].

4.2 Prozessparameter von SU-8

Abbildung 4.2 zeigt die Schritte zur Prozessierung einer SU-8-Schicht, wie sie mit den besonderen Anforderungen für hohe Schichtdicken und raue Substrate in Kapitel 3 erläutert werden. Um die Einsatzgrenzen von SU-8 für elektrothermische Mikroaktoren abzuleiten, sind eigene Versuche notwendig.

In der Literatur gibt es eine große Zahl an Prozessparametern für SU-8. Tabelle 4.2 zeigt die in der Literatur gefundenen Wertebereiche für die einzelnen Prozessparameter des Werkstoffs. Die Schritte Softbake, Belichtung, Postbake und Hardbake sind entscheidend für die Struktur- und Materialqualität. Die für diese Schritte sinnvollen Parameter und die Wertebereiche für eigene Untersuchungen werden im folgenden diskutiert und festgelegt.

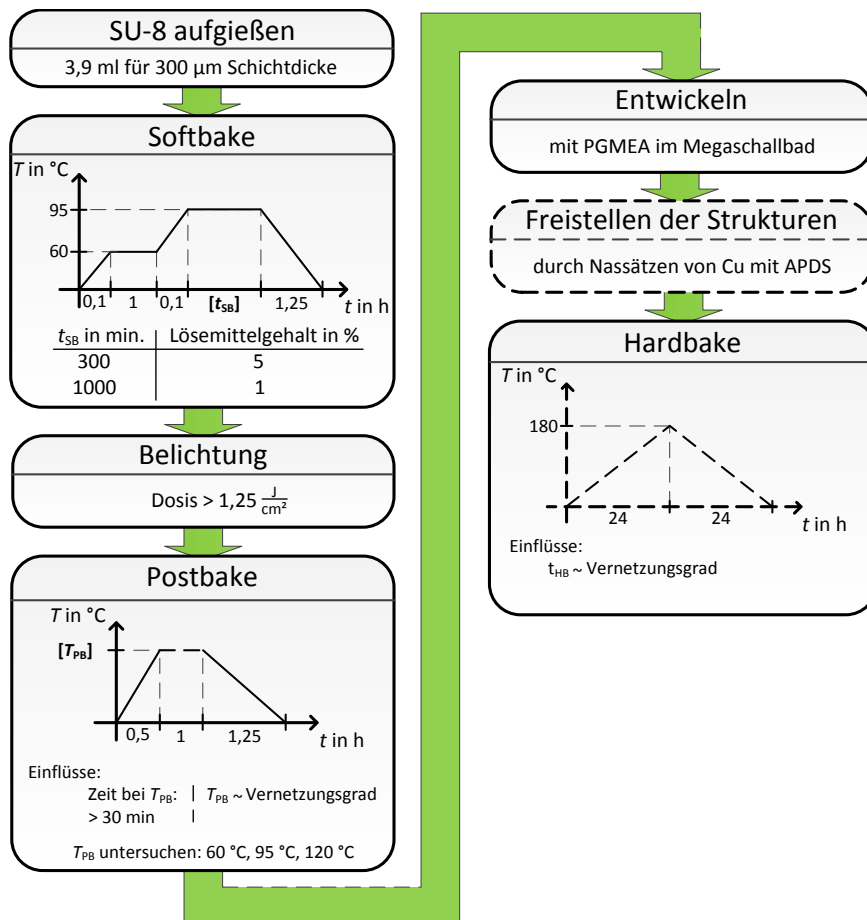


Abbildung 4.2.: Prozessschritte für 300 µm SU-8 mit Parametern

4.2.1 Softbake

Der Softbake dient dazu, den flüssigen Lack zu trocknen. Bei zu hoher Softbaketemperatur über 100 °C zersetzt sich der Photoinitiator und der Kontrast des Lacks sinkt. Weiterhin können, besonders bei Wärmeeinkopplung von unten auf einer Hotplate, vertikale Lösemittelgradienten entstehen. *Lui* und *Kouba et. al.* beobachten, dass es zum seitlichen Verlaufen (Sidewall-Bow) der Strukturen kommt, was von schlechter Formtreue bis zum Kollaps der Strukturen führen kann [78, 106]. Es wird ein Lösemittelrestgehalt zwischen 1...5 % empfohlen [107]. *Lee et. al.* führen ein zweistufiges Verfahren für den Softbake [108]: Der Lack wird für einige Minuten bei 65 °C oberhalb der Erweichungstemperatur gehalten, um durch die Oberflächenspannung die Schicht einzuebenen und im Anschluss bei 95 °C fertig getrocknet.

Staab zeigt, dass besonders bei dicken, gegossenen SU-8-Schichten auf rauen Substraten ein zweistufiger Softbake mit Einebnungsphase notwendig ist. Der Schritt findet für eine Stunde bei 60 °C abgedeckt unter Lösemittelatmosphäre statt, um die Viskosität der Lackschicht zu erhalten und so das Einebnen von Schichtdickenunterschieden durch die Oberflächenspannung zu ermöglichen. Danach wird die Abdeckung entfernt und der Lack bei der im Datenblatt angegebenen und weitläufig verwendeten Temperatur von 95 °C getrocknet. In 1:25 h wird der Lack auf Raumtemperatur gebracht, um Spannungsrisse zu vermeiden.

Die für die Restlösemittelgehalte 1 % und 5 % nötigen Backzeiten werden in einem Vorversuch bestimmt. Die für eine Schicht von 300 µm nötige Lackmenge von 3,9 ml SU-8 2025 wird auf einen Wafer dispensiert, verteilt und der oben beschriebene zweistufige Softbake durchgeführt. Zum

Tabelle 4.2.: Prozessparameter für SU-8 aus der Literatur

Schritt	Parameter	Einheit	Wertebereich	Median	Quelle
Softbake	Temperatur	°C	65...105	95	[10, 78, 84, 92, 99–104]
	Zeit	min.	50...1500	120	[78, 84, 92, 99–104]
Postbake	Temperatur	°C	60...120	90	[10, 78, 84, 85, 92, 99–105]
	Zeit	min.	20...210	30	[10, 78, 84, 85, 92, 99–105]
Hardbake	Temperatur	°C	95...238	120	[10, 84, 85, 92, 99, 104]
	Zeit	min.	20...2880	45	[10, 84, 85, 92, 99, 104]

Zeitpunkt des Dispensierens wird das Lackgewicht mit der Feinwaage KERN EW620 zu 5,066 g bestimmt. Mit den Herstellerangaben [109] zu Dichte und Volumenanteil von Monomer und Lösemittel ergibt sich ein Masseanteil des Lösemittels von 31,5 %, was dem Sollwert nach Datenblatt von 32 % sehr gut entspricht. Während des Backens wird der Wafer in zunächst 10-minütigen und später längeren Abständen gewogen. Aus dem aktuellen Gewicht bestimmt sich der Restlösemittelanteil der Schicht. Abbildung 4.3 zeigt die resultierenden Kurven für zwei Wafer. Als Zeitpunkt t_0 ist der Temperatursprung auf 95 °C zum Ende der Einebnungsphase und das Abnehmen der Abdeckung definiert. Es ergeben sich Backzeiten von 300 min (5 h) für 5 % Lösemittelanteil, sowie 1300 min (21:40 h) für 1 % Lösemittelanteil.

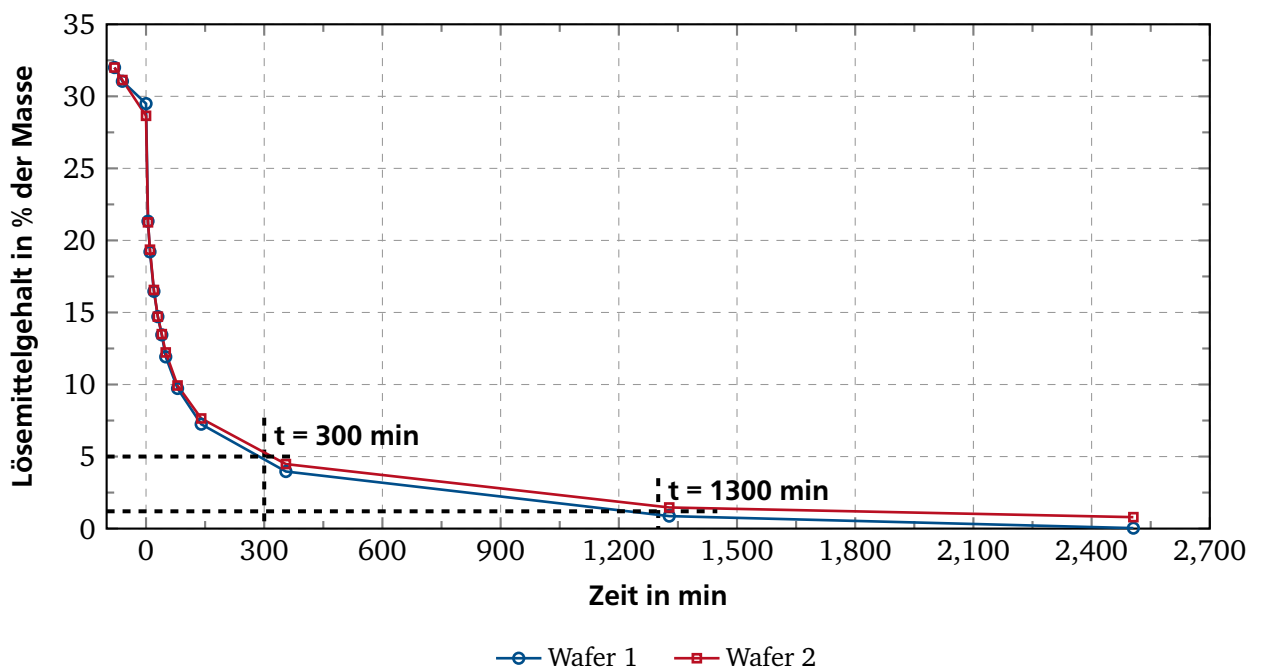


Abbildung 4.3.: Zeitverlauf des Lösemittelgehalts einer SU-8-Schicht von 300 µm während des Softbake mit 95 °C: Nach dem Dispensieren wird die Probe abgedeckt und für eine Stunde bei 60 °C gehalten; Bei $t = 0$ wird der Deckel entfernt und das Lösemittel kann entweichen

4.2.2 Belichtung und Postbake

Die Belichtung der Resistschicht erfolgt mit UV-Strahlung bei 365 nm (i-Line) und einer Schattenmasken, die die als Struktur gewünschten Areale auf dem Wafer offen lässt. Durch die Reduzierung

des UV-Spektrums auf die i-Line wird T-Topping vermieden. *Gaudet et. al.* zeigen anhand der Veränderung der transmittierten Intensität einer SU-8-Schicht während der Belichtung, dass die Änderung bei einer ca. 270 µm dicken Schicht nach 2 min. abgeklungen ist [110]. Dies entspricht einer Dosis von 800 mJ/cm², bei der die Schicht durchbelichtet ist. Dies deckt sich mit den Ergebnissen von *Liu und Becnel et. al.*: Die Belichtungsdosis ist für die Schichthaftung entscheidend. Verbleibt das Material an der Grenze zum unterliegenden Substrat unterbelichtet und unvernetzt, wird die komplette Struktur während des Entwickelns abgehoben. Um den Einfluss der Dosis auf das Vernetzungsverhalten der SU-8-Schicht zu beurteilen sind eigene Untersuchungen nötig. Hierfür werden Belichtungsdosen von 100...2400 mJ/cm² untersucht.

Für den Postbake erweist sich die in der Schicht auftretende Maximaltemperatur als entscheidend für den Grad der Polymerisation durch Polyaddition [85]. Hier stellt sich ein erster Vernetzungsgrad ein, der die Schicht so weit stabilisiert, dass ein Wegentwickeln der unbelichteten Areale möglich wird. Der Postbake ist daher ein einstufiger Schritt. *Schlosser* zeigt, dass bei geringer Postbaketemperatur von 60 °C das nasschemische Entfernen von SU-8 im Acetonbad möglich ist [105]. Dies bietet die Chance der Nutzung von SU-8 als verlorene Galvanoform. Den Einfluss des Postbake auf die Schichtspannungen zeigen *Li et. al.* [111]: Mit der Waferbow-Methode werden SU-8-Schichten nach unterschiedlichen Postbake-Temperaturen verglichen. Es zeigt sich, dass die Vernetzung der SU-8-Schicht bei maximaler Postbaketemperatur am weitesten fortgeschritten ist, ebenso wie die thermische Ausdehnung des Materials. Da sich der Ausdehnungskoeffizient mit dem Vernetzungsgrad reduziert, entsteht während des Abkühlens eine Schichtspannung, die proportional zur maximalen Postbaketemperatur ist. Dabei wird ein langer Postbake empfohlen, bei dem die Schicht gründlich durchheißt und so Gradienten der Eigenschaften vermeidet. Dennoch ist bei zu langem Postbake durch Diffusion sowohl des katalytischen Photoinitiators, als auch der aktivierten Moleküle in unbelichtete Bereiche ein „Verlaufen“ der Strukturen zu erwarten. Dies reduziert die Strukturauflösung und verhindert gegebenenfalls das Freistellen schmaler Gräben.

Feng et. al. [85] beobachten im Zugversuch einen deutlichen Anstieg der Zugfestigkeit für Proben mit Postbake-Temperaturen zwischen 60 °C und 120 °C. Für höhere Temperaturen wird keine Veränderung gemessen. Auf dieser Basis und mit den Ergebnissen von *Schlosser* werden für diese Arbeit die Postbaketemperaturen 60, 95 und 120 °C als Versuchsparameter festgelegt. Der Postbake wird auf einer Hotplate durchgeführt.

4.2.3 Hardbake

Der Hardbake dient zum abschließenden vollständigen Vernetzen des Werkstoffs. *Feng et. al.* [85] zeigen anhand von Versuchen im Postbake, dass die Glasktemperatur mit der Backtemperatur ansteigt und bei 238 °C ihr Maximum erreicht. Bei dieser Temperatur scheint die maximale Vernetzung erreicht. Die wenigsten Anwender wünschen die vollständige Vernetzung von SU-8 und führen keinen Hardbake durch. Daher lassen sich in der Literatur nur wenige Informationen über Prozessparameter und ihren Einfluss finden. Eine hohe Vernetzung ist aufgrund der zu erwartenden hohen mechanischen und thermischen Beständigkeit anzustreben, allerdings kann eine Versprödung und damit frühere Ermüdung des Materials nicht ausgeschlossen werden. Für die Untersuchungen in dieser Arbeit werden daher die Zieltemperaturen 180 °C und 200 °C gewählt, an denen ein Unterschied der Versprödung festgestellt werden kann. Höhere Temperaturen sind aufgrund der Temperaturfestigkeit des hier benutzten Substratmaterials nicht möglich. Um Eigenschaftsgradienten ebenso wie Spannungsrisse zu vermeiden, wird der Hardbake in einem Konvektionsofen durchgeführt und erstreckt sich über 48 h: Über 24 h werden die Proben auf Maximaltemperatur gebracht und danach über die gleiche Zeitspanne wieder abgekühlt.

4.2.4 Parametersätze für die experimentelle Untersuchung von SU-8

Aus den Vorbetrachtungen ergeben sich die in Tabelle 4.3 gezeigten Sätze von Prozessparametern, mit denen in den folgenden Kapiteln die Versuche zu SU-8 durchgeführt werden. Zusätzlich wird das Vernetzungsverhalten für alle sechs Parametersätze bei Belichtungs Dosen von 100...2400 mJ/cm² untersucht. Die Hardbake-Temperatur beträgt beim Großteil der Untersuchungen 180 °C und wird für bei der Betrachtung der Glastemperatur auf 200 °C variiert.

Tabelle 4.3.: Sätze von Prozessparametern für SU-8

Nr.	Softbakezeit in min.	Postbaketemperatur in °C
I	1300	60
II	300	60
III	1300	95
IV	300	95
V	1300	120
VI	300	120

4.3 Untersuchung des Vernetzungsgrades

Um den Einfluss der Prozessparameter auf das Vernetzungsverhalten von SU-8 zu quantifizieren, wird der Vernetzungsgrad in Abhängigkeit der Prozessparameter in eigenen Versuchen bestimmt.

4.3.1 Messmethode: Fourier-Transformations-Infrarotspektrometrie (FT-IR)

Der Vernetzungsgrad bestimmt sich nach der Methode von *Tan et al.* über die Fourier-Transformations-Infrarotspektrometrie (FT-IR) [112]. Abbildung 4.4 zeigt das von *Tan et al.* bestimmte FT-IR-Spektrum einer unvernetzten SU-8-Probe. Dabei ist die Höhe des Peaks bei 914 cm⁻¹ proportional zur Menge unvernetzter Epoxid-Ringmoleküle und nimmt mit zunehmender Vernetzung ab. Da die absoluten Werte der Infrarotspektroskopie von den Reflektionseigenschaften der Schicht, des Substrats und der Schichtdicke abhängen, muss ein im Spektrum vorhandener, an der Vernetzungsreaktion unbeteiligter Peak als Bezug genommen werden. Hierzu dient der aromatische C-C-Ring mit seinem Absorptionspeak bei 1608 cm⁻¹. Der Intensitätsquotient I_{914}/I_{1608} ist unabhängig von den genannten Fehlerquellen und dient als relatives Maß für den Vernetzungsgrad.

4.3.2 Probenfertigung und Versuchsdurchführung

Für die Versuche werden Wafer mit 300 µm SU-8 belackt und nach den sechs Parametersätzen aus Tabelle 4.3 prozessiert. Jeder Wafer wird in acht Quadranten mit Belichtungs Dosen von 100...2400 mJ/cm² unterteilt, um den Einfluss der Belichtungs Dosis abzuleiten. Der Hardbake am Ende der Prozesskette wird für alle Wafer mit 180 °C durchgeführt. Als Substratmaterial dient in diesem Fall Silizium, dessen IR-Spektrum sehr gut untersucht und von SU-8 unterscheidbar ist. Mit Hilfe eines Perkin-Elmer Spektrometers werden alle Proben jeweils nach dem Postbake und nach dem Hardbake untersucht. Abbildung 4.5 zeigt den relativen Vernetzungsgrad der Proben nach Post- und Hardbake, aufgetragen über der Belichtungs Dosis. Die Bezeichnung der Kurven

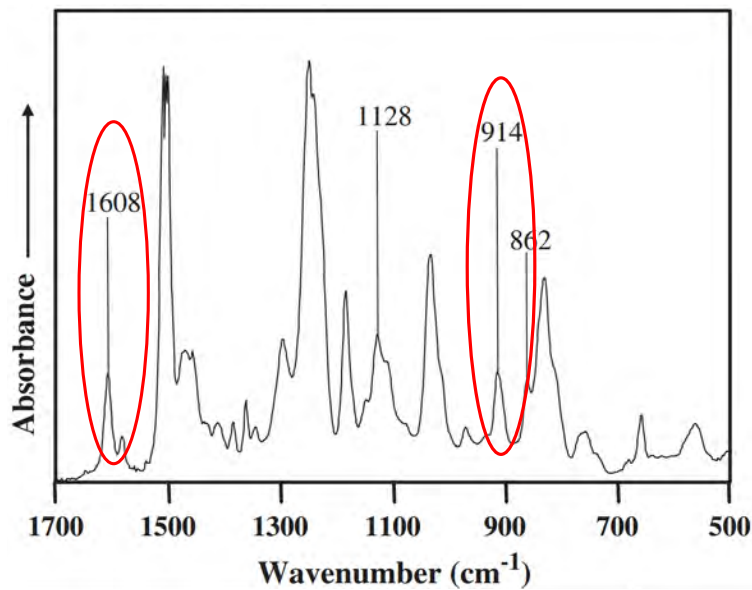


Abbildung 4.4.: FT-IR-Spektrum von unvernetztem SU-8 mit dem Epoxid-Peak bei 914 cm^{-1} und der Referenz bei 1608 cm^{-1} nach Tan et. al. [112]

entspricht den Parametersätzen aus Tabelle 4.3. Die sehr hoch vernetzten Proben Nr. V und VI splintern während des Hardbakes aufgrund hoher intrinsischer Spannungen und können nicht charakterisiert werden (Abbildung 4.5b)).

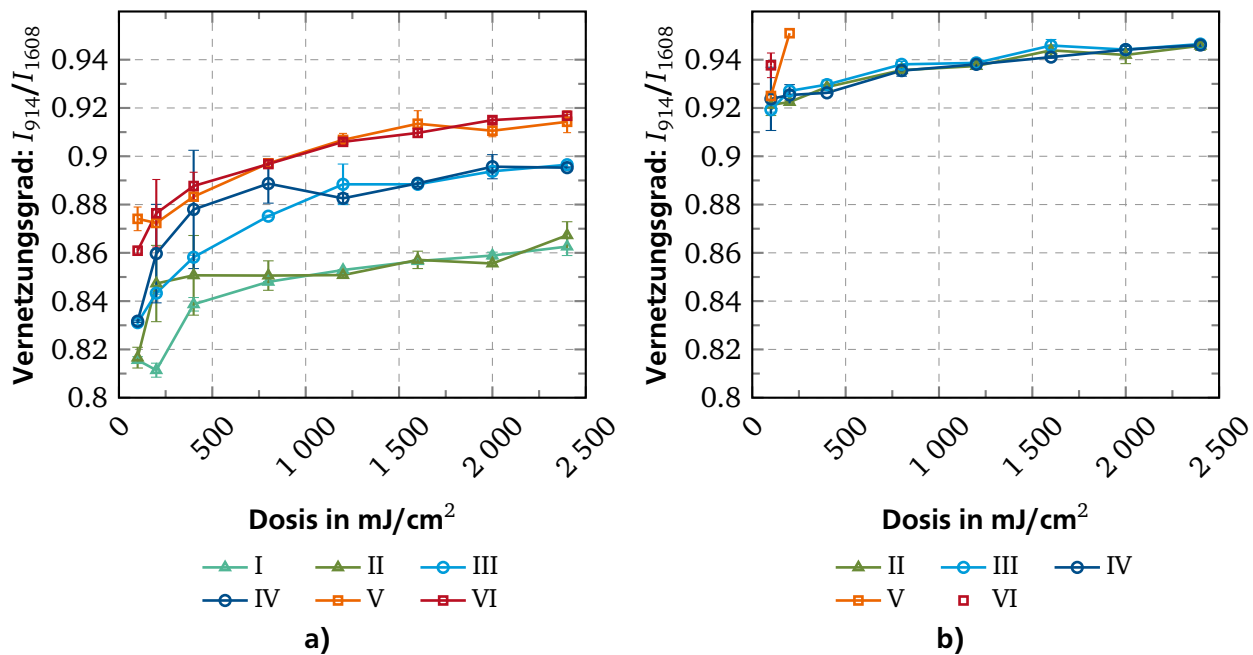


Abbildung 4.5.: Relativer Vernetzungsgrad, gemessen mittels FT-IR-Spektroskopie: a) nach Post-bake; b) nach Hardbake

4.3.3 Diskussion der Ergebnisse

Abbildung 4.5a) zeigt den deutlichen Anstieg des Vernetzungsgrades mit der Postbaketemperatur und der Belichtungs-dosis. Der Einfluss des Lösemittelgehalts in den Proben (Geradzahli-

ge Probennummern gegen ungeradzahlige) ist klein und kann besonders für Belichtungs Dosen $>1000 \text{ mJ/cm}^2$ vernachlässigt werden. Die Abhängigkeit der Vernetzung von der Dosis bestätigt die Ergebnisse von *Gaudet et. al.* [110]: Die Schicht ist bis zu einer Dosis von ca. 750 mJ/cm^2 nicht durchbelichtet. Für höhere Dosen nimmt der Einfluss auf die Vernetzung ab. Für die drei untersuchten Postbaketemperaturen zeigt sich der gleiche qualitative Kurvenverlauf, die untersuchten Parameter sind also nicht von einander abhängig. Die Maximaletemperatur selbst hat auf die Vernetzung den größten Einfluss.

Die Ergebnisse nach dem Hardbake in Abbildung 4.5b) weisen wie erwartet den höchsten Vernetzungsgrad auf. Die Kurven liegen eng zusammen: Unabhängig von den vorangegangenen Prozessparametern gleicht der Hardbake die Vernetzung der Schichten an. Eine leichte Abhängigkeit der Eigenschaften von der Belichtungs dosis wird dennoch beobachtet.

Eine Wölbung der Proben durch intrinsische Spannungen ist bei allen Prozessparametern zu beobachten. Je höher die Postbaketemperatur, desto höher sind die Eigenspannungen, aber auch die Steifigkeit der Schicht, was sich mit den Ergebnissen von *Li et. al.* deckt [111]. Mit dem Hardbake gleichen sich auch die Eigenspannungen an, weshalb die Wölbung der Proben mit niedriger Postbaketemperatur durch den Hardbake stark zunimmt. Weiterhin scheinen die Proben mit höherem Vernetzungsgrad zu verspröden, was sich an starker Rissbildung, bzw. dem Splittern der Proben V und VI zeigt.

4.3.4 Fazit

Die Versuche zeigen, dass ein geringer Lösemittelgehalt keinen messbaren Einfluss auf die Vernetzung der SU-8-Proben hat. Daher kann ein kurzer Softbake mit einer Backzeit von 300 min eingesetzt werden. Für eine gute Vernetzung sind eine möglichst hohe Belichtungs dosis und eine hohe Postbaketemperatur zu wählen. Versuche zeigen aber, dass Dosen $>1500 \text{ mJ/cm}^2$ und besonders die Postbaketemperatur von 120°C zu stark reduzierter Strukturauflösung führen. Gründe hierfür sind Überbelichtung und Diffusion der aktivierten Moleküle in unbelichtete Areale während des Postbakes. Als guter Kompromiss zwischen Vernetzung und Strukturtreue stellen sich 1500 mJ/cm^2 und 95°C heraus, was zusammen mit kurzem Softbake dem Parametersatz IV entspricht. Dieser wird für die meisten Materialproben und vor allem für die Herstellung der Mikroaktoren verwendet.

4.4 Untersuchung der Glas temperatur

Die Versuche zum Vernetzungsgrad lassen auf eine verbesserte Materialbeständigkeit mit steigenden Postbake-Temperatur und eine angleichende Wirkung des Hardbake schließen. Beim Einsatz von SU-8 für elektrothermische Mikroaktoren wird der Werkstoff einer thermomechanisch zyklischen Belastung ausgesetzt, auf deren Belastungsgrenze nicht aus dem Vernetzungsgrad geschlossen werden kann. Daher wird im Folgenden das viskoelastische Verhalten und der Glasübergang von SU-8-Proben mit den bekannten Prozessparametern untersucht.

4.4.1 Bestimmung der Glas temperatur mittels DMA

Zur Bestimmung des viskoelastischen Verhaltens und der Glas temperatur wird die Dynamisch-Mechanische Analyse (DMA) eingesetzt [113]. Dabei wird eine beidseitig eingespannte Materialprobe mit einer definierten sinusoidalen Kraft beaufschlagt und die Wegantwort bestimmt. Aus Betrag und Phase der beiden Größen folgen die komplexen Spannungs- und Dehnungsverhältnisse in der Probe, die mit dem komplexen E-Modul E^* in Gleichung 4.1 beschrieben werden.

Zudem wird die Probentemperatur im Verlauf des Experiments erhöht, was die Beschreibung des Temperaturverhaltens ermöglicht.

$$\underbrace{E^*(\omega, T)}_{\text{Komplexer E-Modul}} = \underbrace{E'(\omega, T)}_{\text{Speichermodul}} + j \underbrace{E''(\omega, T)}_{\text{Verlustmodul}} \quad (4.1)$$

Unter dem **Speichermodul** versteht man die Steifigkeit eines viskoelastischen Materials, die proportional zur gespeicherten Spannenergie in einem Bewegungszyklus ist. Der Speichermodul entspricht bei kleiner, elastischer Materialbelastung in guter Näherung dem E-Modul. Der **Verlustmodul** ist proportional zur Energie, die während eines Zyklus in Form von Wärme oder plastischer Verformung von der Probe aufgenommen wird. Der Phasenwinkel $\tan \delta$ wird als **Verlustfaktor** bezeichnet und ist ein Maß für mechanische Dämpfung oder innere Reibung der Probe. Abbildung 4.6 zeigt ein typisches Diagramm einer DMA nach [113].

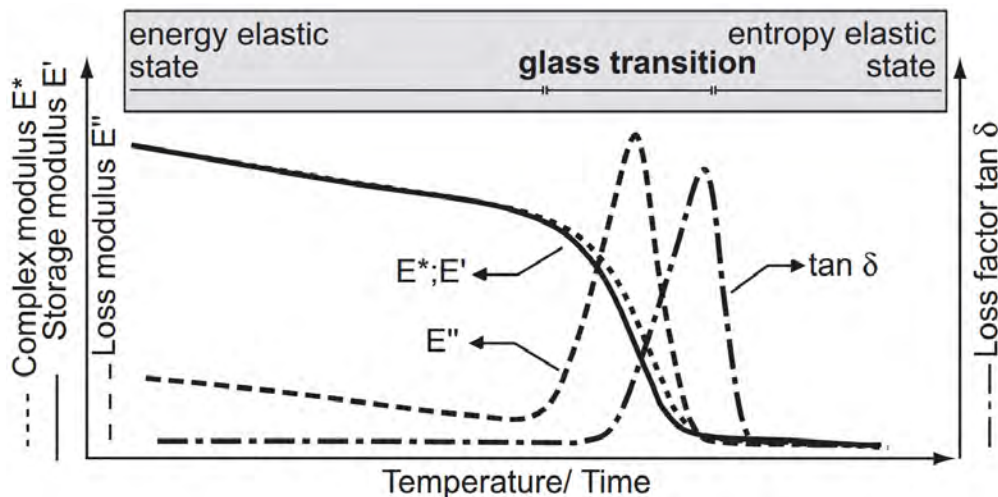


Abbildung 4.6.: Schematisches Diagramm einer Dynamisch-Mechanischen Analyse nach Ehrenstein [113]: Komplexer E-Modul E^* , Speichermodul E' , Verlustmodul E'' und Verlustfaktor $\tan \delta$ werden über der Probentemperatur aufgetragen

Der Speichermodul fällt in guter Näherung linear mit der Temperatur ab, bis der Glasübergangsbereich erreicht wird. In dieser Phase ist das Material glashart und zeigt weitgehend elastisches Verhalten. Mit dem Glasübergang, der am schnellen Anstieg von Verlustmodul und -faktor zu erkennen ist, fällt der Speichermodul innerhalb einer kleinen Temperaturspanne fast vollständig ab, das Material erweicht. Für thermoplastische Werkstoffe ist dieser Vorgang reversibel, Duroplaste wie SU-8 erweichen dauerhaft. Ziel der Untersuchung in dieser Arbeit ist zum einen der Glasübergangsbereich, aus dem sich die maximale Betriebstemperatur für die elektrothermischen Aktoren ableitet, und zum anderen der temperaturabhängige Speichermodul, der als Modellierungsgrundlage für die Mikroaktoren herangezogen werden soll.

4.4.2 Probenfertigung und Versuchsdurchführung

Die Versuche wurden von Prof. Dr. Vogel an der Westsächsischen Hochschule Zwickau, Fakultät Kraftfahrzeugtechnik, Abteilung Experimentelle Festkörper- und Mikromechanik durchgeführt [114]. Dort steht eine DMA-Anlage vom Typ DMA 242 C der NETZSCH Gerätebau GmbH zur Verfügung. Hierfür werden rechteckige SU-8-Proben in der Größe $24 \times 5 \times 0,3 \text{ mm}^3$ gefertigt. Hierzu

wird eine SU-8-Schicht mit 300 µm Dicke auf der Kupferkaschierung eines FR4-Substrats mit den im vorigen Kapitel festgelegten Parametern gefertigt und durch Ätzen des Kupfers vom Substrat gelöst. Abbildung 4.7 zeigt eine hergestellte Probe und das Zugmodul der Prüfmaschine DMA 242 C mit eingespannter Probe.

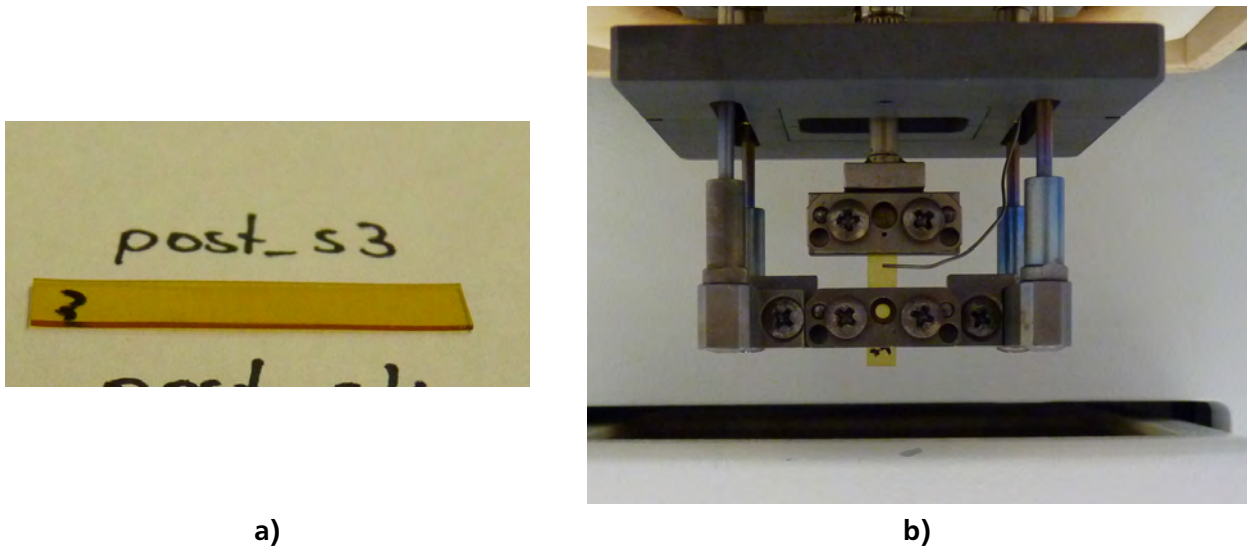


Abbildung 4.7.: Durchführung der DMA: a) Streifenprobe in der Größe $24 \times 5 \times 0,3 \text{ mm}^3$; b) Zugmodul der DMA 242 C mit eingespannter Streifenprobe und Temperaturfühler

Für die Versuche werden die Proben mit einer statischen Kraft von 0,5 N vorgespannt und eine dynamische Kraft von 1 N überlagert. Dies führt in der Probe zu maximalen Zugspannungen von 12 MPa und liegt deutlich unter der Bruchspannung von 34 MPa. Beginnend bei Raumtemperatur wird die Temperatur der Probe mit einer Rate von 1 K/min bis maximal 240 °C erhöht und das Materialverhalten aufgenommen. Dabei werden die Postbake-Temperatur auf allen drei Stufen, der Hardbake bei 180 °C und 200 °C, sowie der Einfluss der Anregungsfrequenz untersucht.

4.4.3 Diskussion der Ergebnisse

Abbildung 4.8 zeigt beispielhaft das Ergebnis einer Probe mit einer Postbake-Temperatur von 120 °C und Hardbake bei 180 °C. Die charakteristischen Kurvenformen für ein Duromer, wie in Abbildung 4.6 vorgestellt, sind gut zu erkennen. Bereits ab 60 °C steigt der Verlustfaktor leicht an. Ab 145 °C zeigt sich ein deutlicher Anstieg, der bei geringfügig höherer Temperatur auch mit einem starken Einbruch des Speichermoduls einhergeht: Der Glasübergangsbereich ist erreicht.

Die Abhängigkeit des Speichermoduls von der Postbaketemperatur vor dem Hardbake ist in Abbildung 4.9a) dargestellt, das Verhalten nach dem Hardbake zeigt Abbildung 4.9b). Die Kurven wurden bei den Frequenzen 1 Hz, 10 Hz und 100 Hz aufgenommen. Der qualitative Verlauf der Kurven ist für alle Frequenzen in guter Näherung gleich. Bei höheren Frequenzen setzen die Kurven häufig niedriger an, weil die plastischen Verformungsanteile größer werden. Mit steigender Temperatur gleichen sich die Kurven an. Dies ist hier besonders für die Messungen bei 100 Hz sichtbar. Die Anregungsfrequenz wird auf Grund des geringen Einflusses im Folgenden nicht weiter diskutiert. Die Proben vor dem Hardbake weisen bei Raumtemperatur einen Speichermodul von 3 GPa auf, was etwas niedriger, als der Literaturwert aus Tabelle 4.1 ist. Der Speichermodul fällt mit der Temperatur, ein Abfall der Kurven als Indikator für den Glasübergang ist nicht klar erkennbar. Die Werte der Probe mit Parametersatz VI liegen insgesamt niedriger, was auf einen Fehler in

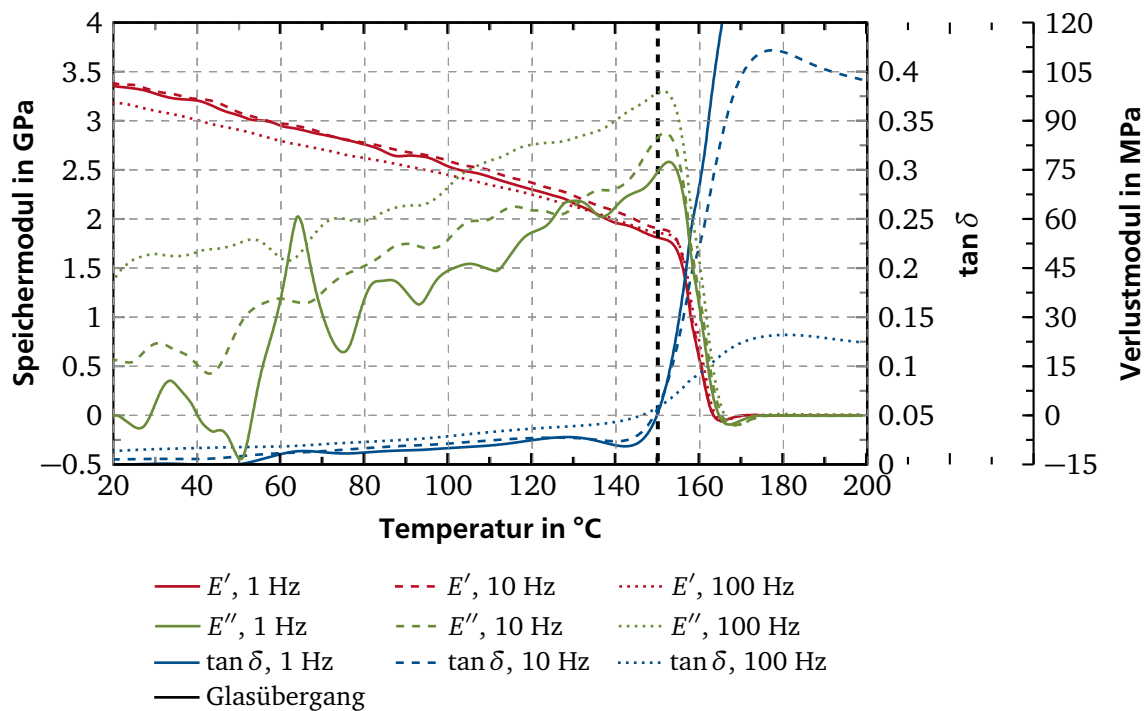


Abbildung 4.8.: DMA von SU-8 - Speichermodul E' , Verlustmodul E'' und Verlustfaktor $\tan \delta$ einer Streifenprobe (Postbake: 120 °C; Hardbake: 180 °C), gemessen bei den Anregungsfrequenzen 1 Hz, 10 Hz und 100 Hz; Es zeigt sich ein typisch duroplastisches Verhalten mit einem deutlichen Glasübergang bei 150 °C und sehr geringer plastischer Verformung

der Schichtdickenbestimmung oder eine ungenaue Einspannung schließen lässt. Die Probe erweist sich aber durch ihre höhere Postbake-Temperatur als beständiger bei hohen Temperaturen.

Die Eigenschaften der Proben nach dem Hardbake liegen enger beieinander, was auf eine gute Vernetzung schließen lässt. Der Verlauf des Speichermoduls über der Temperatur weist für alle Proben eine vergleichbare Steigung auf. Auch der Beginn des Glasübergangs ist über das Abknicken der Kurven bei allen Proben zu erkennen. Allerdings ist hier, im Vergleich zu den Versuchen zum Vernetzungsgrad, keine homogenisierende Wirkung des Hardbake zu erkennen. Die Glastemperatur bestimmt sich deutlich anhand des vorangegangenen Postbake. Die jeweiligen Glastemperaturen sind in Abbildung 4.9 markiert. Die Probe mit dem Parametersatz II weist bei ca. 130 °C einen weiteren Knick auf, der auf einen zweiten Glasübergang schließen lässt. Dieses Verhalten wird nicht weiter ergründet, da es den Einsatz des Werkstoffs für die Mikroaktoren nicht beeinflusst.

Der Vergleich zweier Proben mit Postbake bei 95 °C und Hardbake bei zwei Temperaturen, 180 °C (genannt „HB180“) und 200 °C (genannt „HB200“) ist in Abbildung 4.10 dargestellt. Die Kurve HB200 liegt etwas tiefer, was einem Messfehler bei der Schichtdickenbestimmung oder einer Verdrehung der Probe im Zugmodul zuzuschreiben ist. Es zeigen sich deutliche Unterschiede in den Kurvenverläufen: Die Probe HB180 weist bei ca. 135 °C den charakteristischen Anstieg des Verlustfaktors, sowie einen Einbruch des Speichermoduls auf. Dieser Einbruch ist gut sichtbar, aber nicht stark ausgeprägt. Die höhere Hardbaketemperatur von 200 °C führt zu einer weiteren Reduzierung der Krümmung, ein deutlicher Einbruch ist erst bei ca. 225 °C zu erkennen. Erst der Anstieg des Verlustmoduls bei ca. 160 °C zeigt das Erreichen des Glasübergangsbereichs. Am Verlauf des Speichermoduls kann der Glasübergang also nicht mehr abgelesen werden.

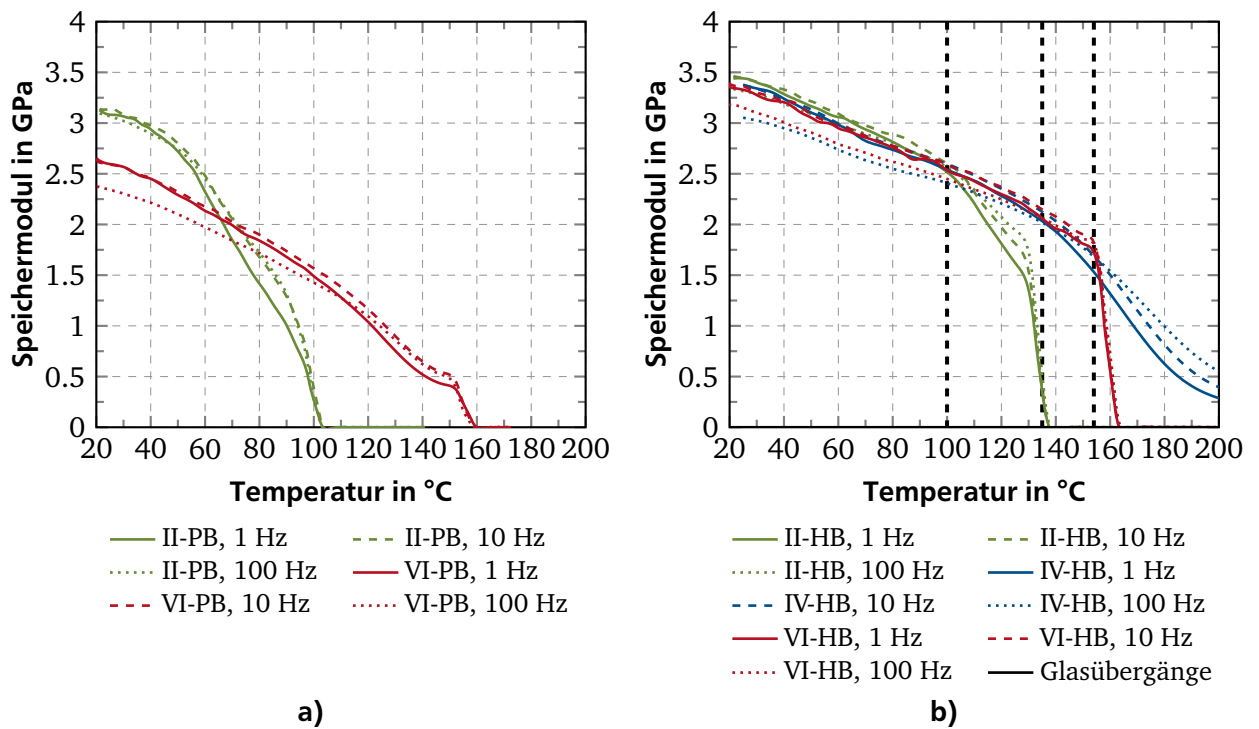


Abbildung 4.9.: Vergleich zwischen Postbake-Temperaturen - Speichermodul für Proben vor und nach Hardbake mit 180 °C (gemessen bei 1 Hz, 10 Hz und 100 Hz): a) Postbake-Temperaturen von 60 °C und 120 °C vor Hardbake; b) Postbake-Temperatur von 60 °C, 95 °C und 120 °C nach Hardbake

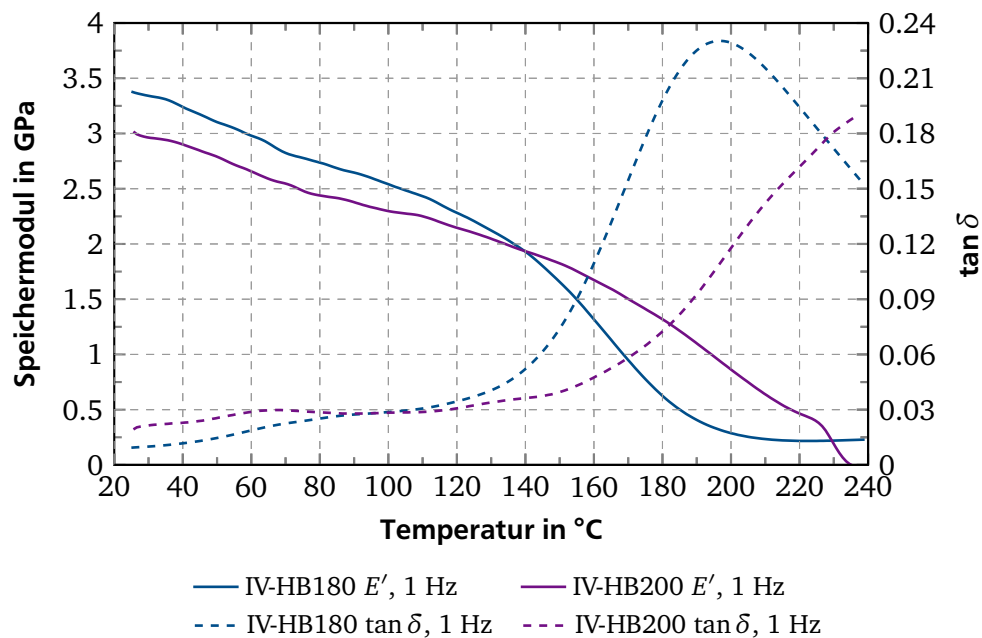


Abbildung 4.10.: Vergleich zwischen Hardbake-Temperaturen - Speichermodul und Verlustfaktor für Proben mit einer Postbake-Temperatur von 95 °C und Hardbake bei 180 °C und 200 °C (gemessen bei 1 Hz)

4.4.4 Fazit

Die Untersuchungen zur Glasübergangstemperatur von SU-8 zeigen, dass die Temperaturen jedes vernetzenden Backschritts so hoch wie möglich zu wählen sind, um einen hochbeständigen Werkstoff zu erhalten. Bereits im vorangegangenen Kapitel zeigt sich die Reduzierung der Strukturauflösung mit steigenden Backtemperaturen, weshalb hier Kompromisse gemacht werden müssen. Auch die Temperaturfestigkeit des in dieser Arbeit verwendeten kostengünstigen Substratmaterials FR4 mit 180 °C ist zu berücksichtigen. Daher werden in dieser Arbeit eine Postbake-Temperatur von 95 °C und eine Hardbake-Temperatur von 180 °C verwendet. Als maximale Betriebstemperatur der Mikroaktoren bei diesen Prozessparametern wird 120 °C festgelegt, was um 15 K unter dem hier bestimmten Glasübergangsbereich liegt.

4.5 Untersuchung der intrinsischen Schichtspannungen

Die Versuche zum Vernetzungsgrad in Kapitel 4.3 zeigen, dass sich in SU-8 prozessabhängige intrinsische Spannungen aufbauen, die bei freigestellten Strukturen zu Schwindung führen. Da dies zur Verformung von Strukturen führen kann, werden im Folgenden Versuche mit den oben genannten Sätzen von Prozessparametern durchgeführt.

4.5.1 Bestimmung der Spannungen durch Zeiger-Teststrukturen

Die gängigste Methode zur Bestimmung von Schichtspannungen entstammt der Halbleiterindustrie: Unter der Annahme dünner Schichten und homogener Schichtspannung auf der Waferfläche wird die Durchbiegung, der sog. Waferbow, bestimmt und mit Hilfe der Balkentheorie auf die intrinsische Spannung geschlossen. Durch die dicken SU-8-Schichten und die prozessbedingte Dickenstreuung sind die Annahmen für den Einsatz dieser Methode aber nicht erfüllt. Daher kommen Zeiger-Teststrukturen zum Einsatz, die sich nach *Elbrecht et. al.* sehr gut zur Bestimmung von Schichtspannungen eignen [115]. Abbildung 4.11 zeigt eine solche Struktur, bestehend aus einem Koppel-, Test- und Zeigerbalken.

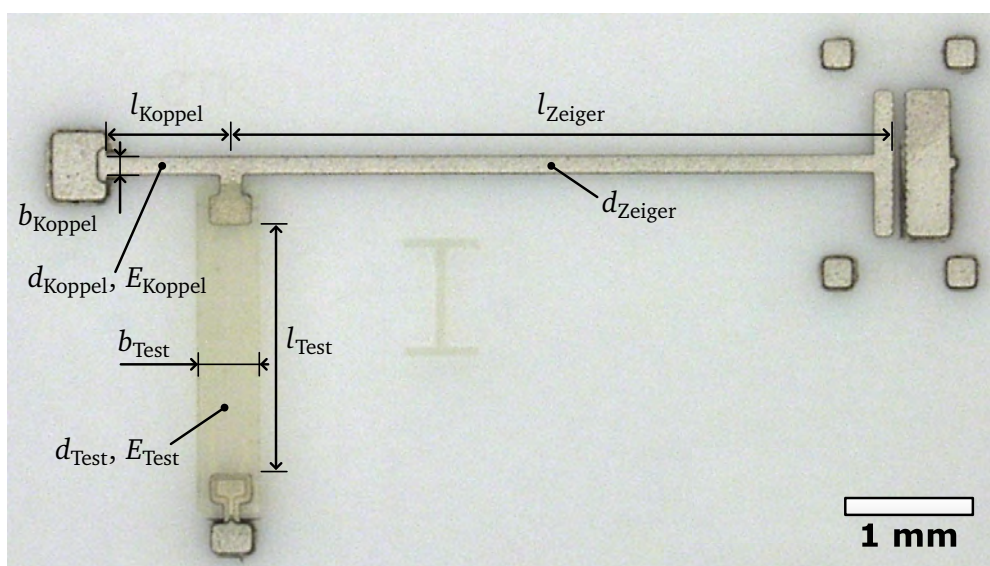


Abbildung 4.11.: Zeiger-Teststruktur zur Bestimmung der Schichtspannungen von SU-8 mit geometrischen Parametern

Schrumpft der Testbalken, stellt sich ein Kräftegleichgewicht mit der Nachgiebigkeit des Koppelbalkens ein. Dabei wird die intrinsische Spannung als externe Kraft angenommen, die der Eigensteifigkeit des Testbalkens entgegenwirkt. Der Zeigerbalken verstärkt die resultierende Auslenkung. Abbildung 4.12 zeigt den freigeschnittenen Koppelbalken mit den wirkenden Kräften.

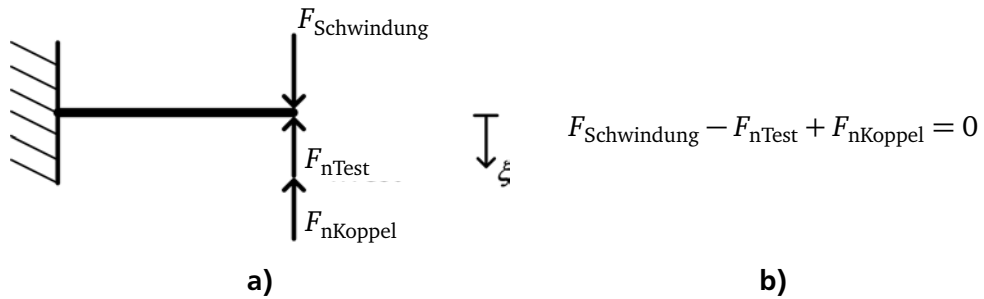


Abbildung 4.12.: Kräftegleichgewicht aus den Nachgiebigkeiten von Test- und Koppelbalken, sowie der durch die Schwindung hervorgerufenen Kraft im Testbalken: a) Freischnitt am freien Ende des Koppelbalkens; b) Summe der wirkenden Kräfte

Das Kräftegleichgewicht (siehe Abbildung 4.12b)) wird mit den Flächenträgheitsmomenten von Rechteckbalken für den Koppelbalken und den Testbalken, sowie die Stauchung des Testbalkens aufgestellt und nach der Auslenkung des Koppelbalkens aufgelöst. Über die Neigung der Spitze des Koppelbalkens und die Übersetzung des Zeigers der Länge l_{Zeiger} berechnet sich die Zeigerauslenkung ξ_{Zeiger} . Mit der Länge l_{Test} , der Breite b_{Test} , der Dicke d_{Test} und der mechanischen Spannung $\sigma_{\text{Intrinsisch}}$ des Testbalkens, der Länge l_{Koppel} , der Breite b_{Koppel} und der Dicke d_{Koppel} des Koppelbalkens, sowie beiden E-Moduli ergibt sich Gleichung 4.2.

$$\xi_{\text{Koppel}} = \frac{\sigma_{\text{Intrinsisch}} \cdot b_{\text{Test}} \cdot d_{\text{Test}}}{\frac{E_{\text{Test}} \cdot b_{\text{Test}} \cdot d_{\text{Test}}}{l_{\text{Test}}} + \frac{1}{4} \cdot b_{\text{Koppel}} \cdot E_{\text{Koppel}} \cdot \left(\frac{d_{\text{Koppel}}}{l_{\text{Koppel}}}\right)^3} \quad (4.2)$$

$$\xi_{\text{Zeiger}} = \tan(\omega'(l_{\text{Koppel}})) \cdot l_{\text{Zeiger}} = \tan\left(\frac{3}{2} \cdot \frac{\xi_{\text{Koppel}}}{l_{\text{Koppel}}}\right) \cdot l_{\text{Zeiger}} \quad (4.3)$$

Beide Gleichungen werden in Matlab®implementiert und die intrinsische Spannung aus der Zeigerauslenkung und den Strukturabmessungen numerisch bestimmt.

4.5.2 Auslegung und Fertigung der Teststrukturen

Tabelle 4.4.: Abmessung der drei Varianten von Zeigerstrukturen

	l_{Koppel} in mm	b_{Koppel} in μm	d_{Koppel} in μm	l_{Test} in mm	b_{Test} in μm	d_{Test} in μm	l_{Zeiger} in mm
A	1	100	50	2	500	300	5,1
B	2	100	50	4	500	300	5,1
C	1	100	50	1	500	300	10

Es werden drei Varianten von Zeigerstrukturen ausgelegt, deren Maße in Tabelle 4.4 dargestellt sind. Da numerisch auf die intrinsische Spannung des Testbalkens geschlossen wird, ist keine Geometrieabhängigkeit der Messergebnisse zu erwarten. Um sicherzugehen, werden die drei Varianten

verglichen. Als Konstruktionsmaterialien kommen das zu untersuchende SU-8 für den Testbalken und galvanisch abgeformtes Nickel für die Biegebalken zum Einsatz. Die Materialkennwerte werden der Literatur entnommen. Die erwarteten Spannungen liegen gemäß Tabelle 4.1 bei maximal 19 MPa, was einem Zeigerausschlag von 100 μm entspricht. Dies ist mit dem Digitalmikroskop Keyence VHX gut erfassbar. Die lateralen Strukturabmessungen sind durch die Auflösung der Lithographiemasken festgelegt und weichen nicht messbar von den Sollmaßen ab. Die Schichtdicken der Koppel- und Testbalken werden für jede Struktur mit dem Oberflächenprofilometer VEECO Dektak 8 bestimmt.

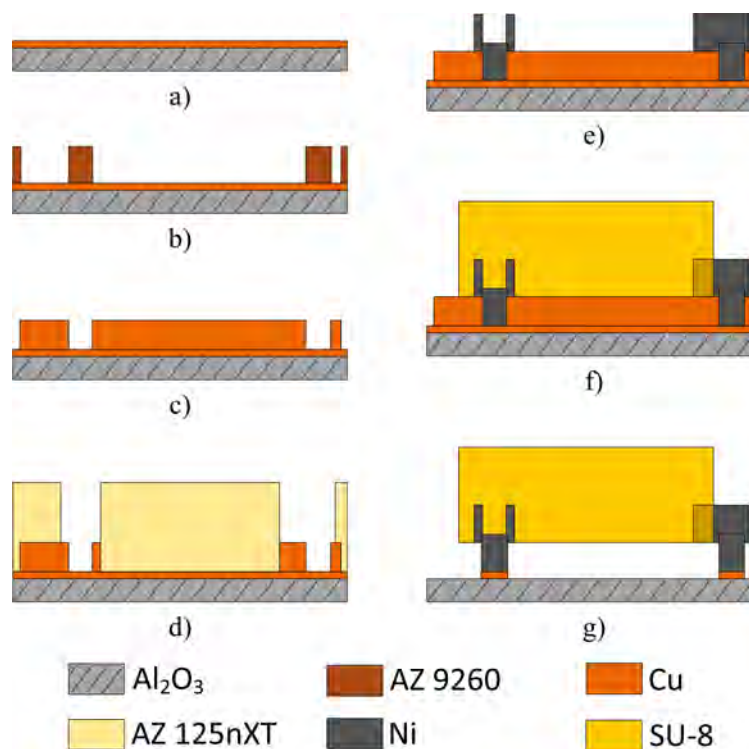


Abbildung 4.13.: Fertigungsschritte der Zeiger-Teststrukturen: a) Galvanostartschicht: 200 nm Cu aufspüttern; b) Opferschicht: 30 μm Galvanoform aus AZ 9260 strukturieren; c) Opferschicht: 25 μm Kupfer aufgalvanisieren; d) Balken und Verankerung: 100 μm Galvanoform aus AZ 125 nXT strukturieren; e) Balken und Verankerung: 50 μm Nickel aufgalvanisieren; f) Testbalken: 300 μm SU-8 2025 strukturieren; g) Freistellen: Nassätzen der Kupferschichten mit APDS; danach: SU-8 Hardbake

Die Teststrukturen werden im Reinraumlabor des Institut EMK auf mehr als 50 Wafern hergestellt. Abbildung 4.13 zeigt die Fertigungsschritte, die in Kapitel 3 detailliert diskutiert werden. Die Teststrukturen aus SU-8 und die Nickelbalken werden durch Kupferopferschichten freitragend gefertigt und durch Nickelpfosten auf dem Substrat verankert. Die Metallstrukturen werden durch Galvanoformung gefertigt. Als Form kommen die Photolacke AZ 9260 für Schichten bis 30 μm und AZ 125nXT für Schichten bis 100 μm zum Einsatz. Um gute Haftung und das reproduzierbare Entwickeln der Galvanoform aus AZ 125nXT zu gewährleisten, wird auf rauen Aluminiumoxid-Substraten prozessiert. Abbildung 4.14 zeigt die Substratverankerung, die Ankopplung des Testbalkens aus SU-8 und im Hintergrund den Zeiger.

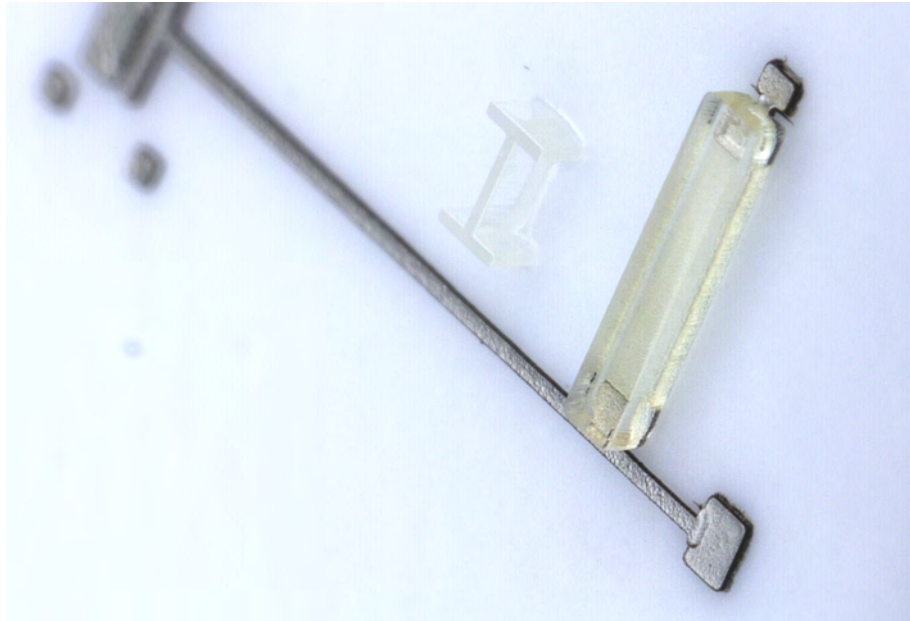


Abbildung 4.14.: Gefertigte Zeiger-Teststruktur

4.5.3 Diskussion der Ergebnisse

Für jeden der sechs Parametersätze werden 33 Strukturen jeweils nach dem Postbake und nach dem Hardbake vermessen. Abbildung 4.15 zeigt die mittleren Beträge der intrinsischen Spannungen mit Fehlerbalken. Es werden Spannungen von 2,2...3,7 MPa nach dem Postbake und 2,5...10,8 MPa nach dem Hardbake erreicht. Die Streuung der Ergebnisse ist sehr hoch, weshalb hier nur Trends angegeben werden können. Es wird jedoch klar, dass der Grad der intrinsischen Vorspannung von SU-8 durch die Wahl der Prozessparameter eingestellt werden kann. Analog zu den Beobachtungen bei der Untersuchung des Vernetzungsgrads in Kapitel 4.3 beeinflusst die Postbaketemperatur die Spannungen am stärksten. Besonders bei geringer Vorvernetzung im Postbake (Proben mit den Parametersätzen I und II) hat der Hardbake einen starken Effekt.

Diese Ergebnisse zeigen zum einen, dass mit einer prozessabhängigen Schwindung zu rechnen ist, diese sich aber durch entsprechende Wahl der Parameter beeinflussen lässt. Neben einer Vermeidung der Schwindung wird es zudem möglich, sie gezielt zur Fertigung von intrinsisch vorgespannten Strukturen, z.B. für normal-geschlossene Klemmmechanismen, einzusetzen.

4.5.4 Intrinsisch vorgespannte Strukturen

Zur Prüfung der These, dass sich bei zwei sequentiell gefertigten SU-8-Schichten im gleichen Mikrosystem die im vorigen Kapitel einzeln gemessenen Spannungen aufaddieren, werden Teststrukturen hergestellt. Abbildung 4.16a) zeigt zwei elektrothermische Pseudobimorph-Aktoren, deren innere Balken ausgespart sind. Sie werden in einer zweiten SU-8-Schicht mit anderen Prozessparametern ergänzt. Aus der Verwindung des Pseudobimorph lässt sich die Differenz der inneren Spannungen ablesen. Es werden Proben mit den Parametersätzen I und VI hergestellt, um einen größtmöglichen Effekt zu zeigen. Bei den abgebildeten Strukturen ist der rechte Pseudobimorph durch fehlerhafte Galvanoformung bei einem Abstand von 50 μm zu den innenliegenden Metallpads mechanisch festgebremst und dient als Referenzgeometrie. Der linke Pseudobimorph ist frei. Abbildung 4.16b) zeigt beide Strukturen nach dem Hardbake. Der linke Aktor hat sich um 101 μm

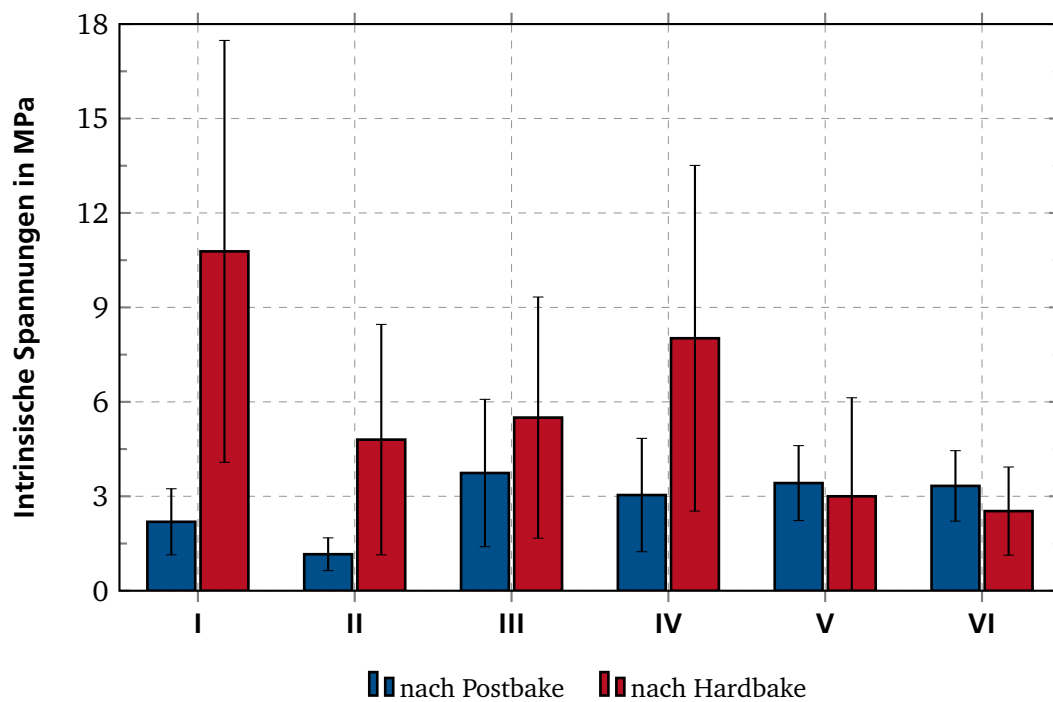


Abbildung 4.15.: Mittelwert und Standardabweichung der intrinsischen Zugspannungen von SU-8-Balken für verschiedene Prozessparameter nach Tabelle 4.3

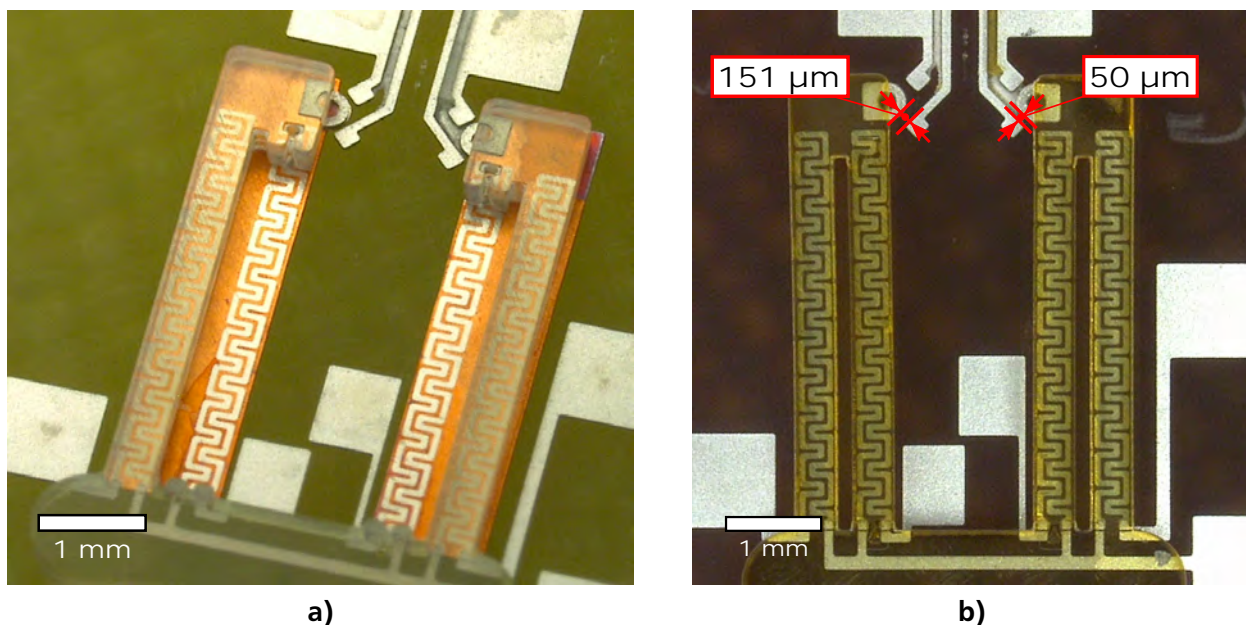


Abbildung 4.16.: Pseudobimorph-Geometrien zur Untersuchung der Differenz intrinsischer Spannungen: a) Pseudobimorph-Aktoren nach erster SU-8-Schicht mit ausgesparten inneren Balken, die rechte Geometrie ist festgebremst; b) Pseudobimorphe nach Hardbake mit deutlicher nach außen gekrümmter Geometrie links (ca. 100 μm)

nach außen gebogen. Die numerische Bestimmung der Spannungsdifferenz ergibt sich zu 13 MPa, was der Größenordnung der in Abbildung 4.15 gezeigten Einzelbeträge entspricht.

Die Versuche zeigen, dass sich durch geeignete Prozessführung intrinsisch vorgespannte Strukturen, bspw. als Klemmung, fertigen lassen. Dies kann für einen im Rahmen dieser Arbeit konzipierten normal-geschlossenen Linearschrittantrieb angewendet werden [218]. Der Antrieb wird im Ausblick in Kapitel 9.2 vorgestellt.

4.6 Zusammenfassung: Prozessparameter und Materialeigenschaften

Die in diesem Kapitel vorgestellten Untersuchungen zeigen den Einfluss der Prozessparameter auf die Eigenschaften von SU-8 mit 300 μm Dicke. Tabelle 4.5 fasst die im Folgenden verwendeten Prozessparameter zusammen. Die in eigenen Versuchen ermittelten Werkstoffeigenschaften sind in Tabelle 4.6 dargestellt.

Tabelle 4.5.: Prozessparameter von 300 μm SU-8 für die Aktorherstellung (neu ermittelte Parameter sind fett gedruckt)

Schritt	Parameter	Einheit	SU-8
Softbake	Homogenisieren (abgedeckt)	$^{\circ}\text{C}$	60
		min	60
	Trocknen	$^{\circ}\text{C}$	95
		min	300
	Abkühlen	min	85
Belichten	Dosis	J/cm^2	1,5
	Spektrum	–	i-line
Postbake	Aufheizen	min	30
	Halten	$^{\circ}\text{C}$	95
		min	60
	Abkühlen	min	85
Hardbake	Aufheizen	$^{\circ}\text{C}$	180
		h	24
	Abkühlen	h	24

Tabelle 4.6.: In eigenen Versuchen ermittelte Werkstoffeigenschaften von SU-8 im Vergleich zu den Werten aus der Literatur (siehe Tabelle 4.1)

Eigenschaft	Einheit	eigene Versuche	aus Literatur[94]
Lösemittelrestgehalt	%	5	–
E-Modul nach Hardbake	GPa	3,5	$4,95 \pm 0,42$
Glasübergangstemperatur nach Hardbake	$^{\circ}\text{C}$	140	≤ 238
Mittlere Schichtspannungen	MPa	8	16...19
Maximale Differenz der Schichtspannungen	MPa	13	–

Im Hinblick auf den Einsatz von SU-8 als Dehnungskörper für elektrothermische Mikroaktoren soll eine maximale Betriebstemperatur von 120 $^{\circ}\text{C}$ nicht überschritten werden, was um 15 K unter dem Glasübergangsbereich liegt.



5 Galvanisch abgeschiedenes Nickel als Werkstoff für mikrostrukturierte Heizelemente

Galvanisch abgeschiedenes Nickel wird im Rahmen dieser Arbeit als Werkstoff für die mikrostrukturierten Heizelemente der Mikroaktoren eingesetzt. Mit dem in Kapitel 3.1.3 vorgestellten zusatzfreien Nickelsulfamatbad und dem verbesserten Fertigungsprozess nach Kapitel 3.3.1 ist es möglich, mäandrierte Leiterbahnen mit einer Schichtdicke von 1,5 μm und einer Breite von 20 μm zu fertigen.

Nickel eignet sich aufgrund seines hohen spezifischen Widerstands und der robusten Fertigbarkeit als Konstruktionsmaterial. Die Werkstoffeigenschaften der miniaturisierten galvanischen Schichten sind jedoch stark von den Fertigungsparametern abhängig und können weder aus der Literatur entnommen, noch vom Bulk-Material übertragen werden. Daher sind eigene Versuche hinsichtlich der für elektrothermische Mikroaktoren relevanten Eigenschaften nötig. Tabelle 5.1 stellt die Eigenschaften sowie die für Bulk-Material aus der Literatur entnommenen Werte mit den Optimierungszielen dar. Die nachfolgend vorgestellten Untersuchungen wurden überwiegend im Rahmen des wissenschaftlichen Vorprojekts „INSIGHT - Integrationsorientierte Verfahren zur Herstellung hybrider Mikrosysteme“ (BMBF FKZ: 16SV5053) erarbeitet [116].

Tabelle 5.1.: Relevante Werkstoffeigenschaften, Werte des Bulk-Materials und Optimierungsziele

Werkstoffeigenschaft	Einheit	Wert von Bulk-Ni	Quelle	Optimierungsziel
E-Modul	GPa	195,5	[117]	klein
Zugfestigkeit	MPa	370	[10]	groß
Intrinsische Spannungen	MPa	–	–	klein
Spezifischer Widerstand	$\Omega\text{mm}^2/\text{m}$	0,069	[117]	groß
Temperaturkoeffizient	$10^{-3} \cdot 1/\text{K}$	6,0	[118]	klein

Die mechanischen Eigenschaften E-Modul, Zugfestigkeit und intrinsische Spannungen von galvanischem Nickel sind im Stand der Technik bereits untersucht und werden anhand einer Literaturrecherche aufgearbeitet. Zur Bestimmung des spezifischen Widerstands und seines Temperaturkoeffizienten in Abhängigkeit der Prozessparameter werden eigene Versuche durchgeführt. Dabei wird die auf geringe intrinsische Spannungen optimierte Zusammensetzung des vorhandenen Nickelsulfamatbads konstant gehalten und nur äußere, schnell und kostengünstig einstellbare Prozessparameter betrachtet. Tabelle 5.2 zeigt die variierbaren Parameter und ihre Wertebereiche.

5.1 Elastizitätsmodul

Der Elastizitätsmodul von galvanisch abgeschiedenem Nickel ist in der Literatur in Abhängigkeit von der Bad-Temperatur, sowie der Abscheidestromdichte untersucht. Dabei kommen Bäder mit Nickelsulfamat-Konzentrationen von 165...300 g/l, bis zu 30 g/l Nickelchlorid und Zusätzen zum Einsatz. Aufgrund der großen Unterschiede in den Zusammensetzungen, werden nur die Ergebnisse von *Luo et. al.* [119] und *Fritz* [120] berücksichtigt, da das dort untersuchte Bad dem in dieser Arbeit verwendeten ähnelt. Abbildung 5.1 zeigt den E-Modul galvanischer Schichten in Abhängigkeit der Badtemperatur und der Stromdichte.

Tabelle 5.2.: Abscheideparameter und Wertebereiche des hauseigenen Nickelsulfamatbads

Parameter	Quelle	Wert	
		Min.	Max.
Temperatur	°C	40	50
Stromdichte	A/dm ²	1	10
Puls-Pause-Verhältnis	–	7/3	9/1
Pulse-Plating-Frequenz	Hz	10	100
Anströmung	l/min	4	10
Kathodenrotation	rpm	7,5	34
Schichtdicken	µm	2	20
Substratmaterial	–	Si	FR4

Es werden Temperaturen $\theta = 20...80$ °C und Stromdichten $J = 0,1...3$ A/dm² untersucht. Trotz der großen Unterschiede in den Badzusammensetzungen liegen die E-Moduli im Bereich von 150...210 GPa. Erst für große Stromdichten >3 A/dm² und sehr hohe Badtemperaturen >60 °C werden geringere Werte erreicht. Für die in dieser Arbeit genutzten Prozessparameter mit im Vergleich hohen Stromdichten nach Tabelle 5.2 ist ein E-Modul von 150 GPa zu erwarten.

5.2 Zugfestigkeit

In der Literatur existieren zu dem hier verwendeten Heizmaterial Nickel bereits mechanische Daten. *Fritz* [120] untersucht auch die Dehngrenze von galvanisch abgeschiedenem Nickel und stellt fest, dass diese Werte im Wesentlichen von der verwendeten Abscheidestromdichte abhängen. Abbildung 5.2 zeigt die Spannungs-Dehnungs-Verläufe von Nickelproben für unterschiedliche Abscheidestromdichten. Für 2 mA/cm² wird eine Zugfestigkeit von 1385 MPa erreicht, bei einer höheren Stromdichte von 15 mA/cm² noch 670 MPa. Der Grund dafür ist die gröbere Metallstruktur bei großen Stromdichten. Die dritte Messkurve von *Hemker* [121] beschreibt ebenfalls galvanisches Nickel, die zu Grunde liegenden Prozessparameter werden aber nicht genannt. Die erreichte Zugfestigkeit beträgt 535 MPa, was mit dem von *Sharpe* [122] veröffentlichten Wert von 530 MPa gut überein. In allen Fällen ist die Zugfestigkeit der galvanisch abgeschiedenen MEMS-Strukturen höher als die des Bulk-Materials von ca. 370 MPa.

5.3 Intrinsische Spannungen

Unter den galvanisch abformbaren Metallen entstehen besonders bei Nickel intrinsische Spannungen, die zu reduzierter Schichthaftung oder dem Ablösen ganzer Strukturen führen können. Sie gilt es daher möglichst gering zu halten. Es lassen sich artfremde und arteigene Spannungen unterscheiden:

- Artfremde Spannungen:

Unterschiedliche Gitterkonstanten von Substrat und galvanischer Schicht führen zu starken Spannungen in der galvanischen Schicht, da diese in das Kristallgitter des Substrats gezwungen wird. Artfremde Spannungen beschränken sich auf die Grenzschicht zum Substrat, ab einer Schichtdicke von ca. 3 µm werden sie von arteigenen Spannungen überlagert [123]

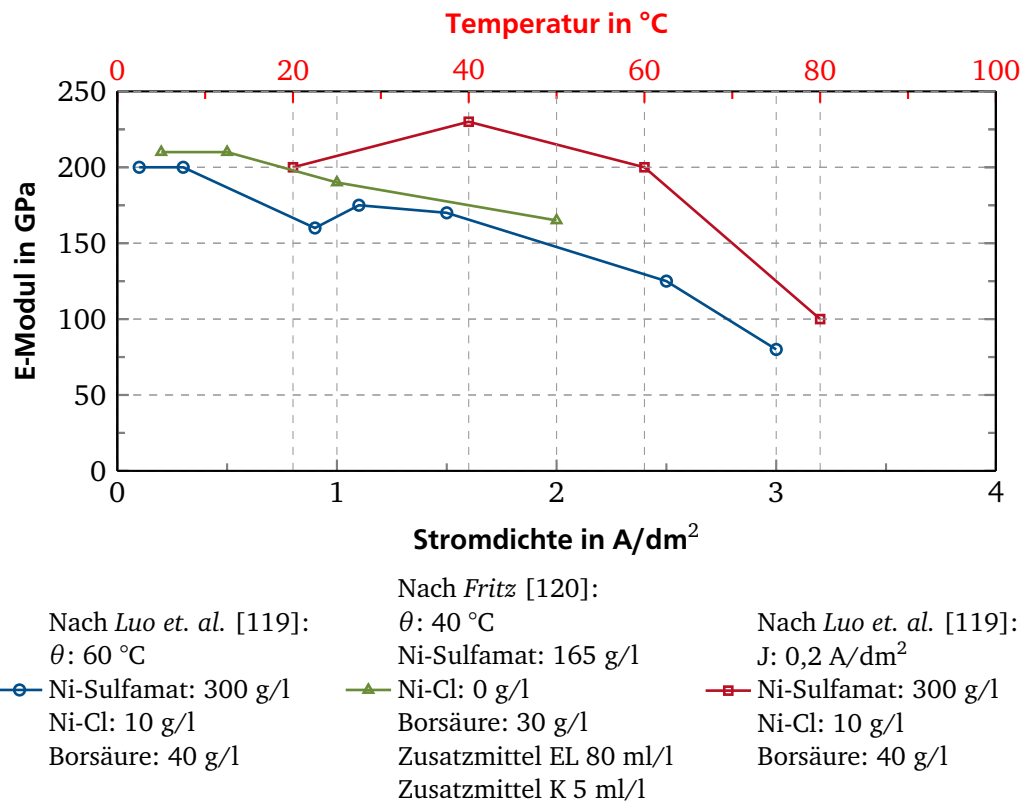


Abbildung 5.1.: Elastizitätsmodul von galvanisch abgeschiedenem Nickel in Abhängigkeit der Prozessparameter nach *Luo et. al.* [119] und *Fritz* [120]

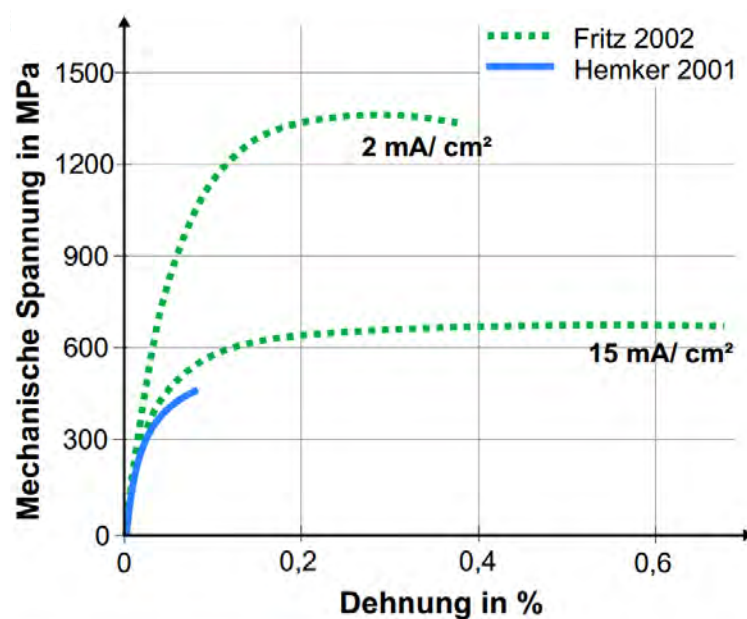


Abbildung 5.2.: Zugfestigkeit von galvanisch abgeschiedenem Nickel in Abhängigkeit der Prozessparameter nach *Fritz* [120] und *Hemker* [121]

- Arteigene Spannungen:

Die Einlagerung von Fremdstoffen während der Abscheidung gilt als Ursache für arteigene Spannungen [56]. Bei Abscheidung mit zu hoher Stromdichte bildet sich Wasserstoff als Nebenprodukt und ruft Zugspannung hervor. Hydroxidionen bei zu hohem pH-Wert oder organische Rückstände im Bad führen ebenfalls zu intrinsischen Spannungen [124]

Den größten Einfluss auf die intrinsischen Spannungen weisen Stromdichte und Temperatur auf, andere Parameter können nach Wohlgemuth [55] vernachlässigt werden. Abbildung 5.3 zeigt die in der Literatur gefundenen Kurven für intrinsische Spannungen nach Diggin [125], Barrett [126], Wohlgemuth [55], Fanner [127] und der Diplomarbeit des Autors [128].

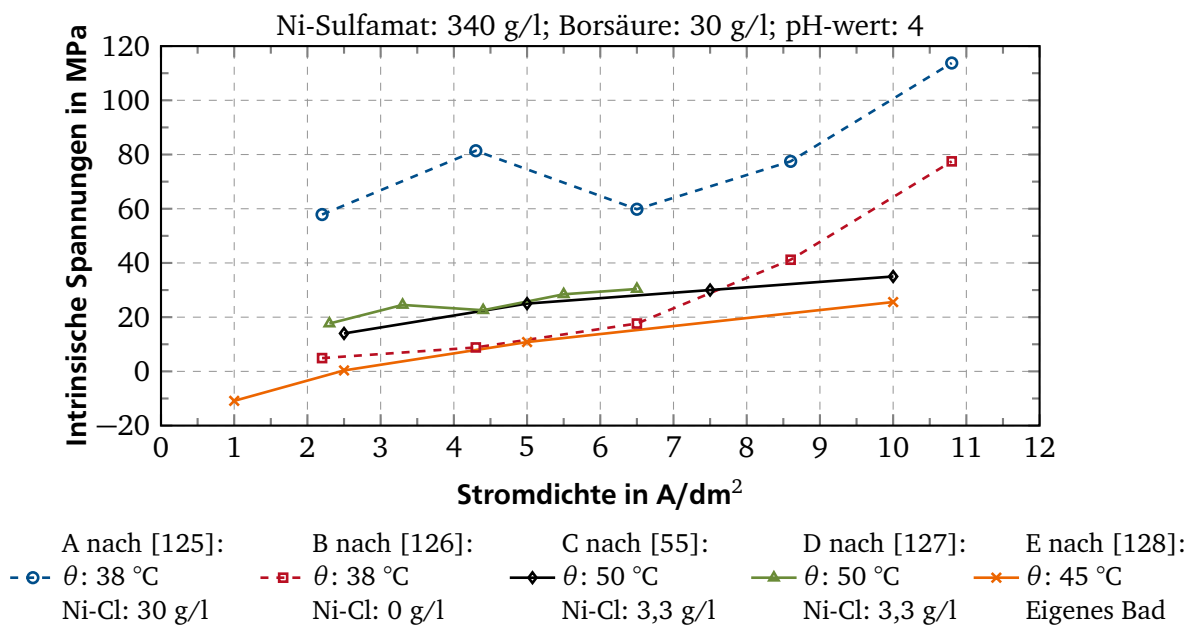


Abbildung 5.3.: Intrinsische Spannungen von galvanisch abgeschiedenem Nickel in Abhängigkeit der Stromdichte für verschiedene Badzusammensetzungen und Temperaturen nach Diggin [125], Barrett [126], Wohlgemuth [55], Fanner [127] und der Diplomarbeit des Autors [128]

Die mit 80 MPa höchsten Spannungen werden bei geringer Badtemperatur und hoher Stromdichte erreicht. Je niedriger die Badtemperatur, desto größer der Einfluss der Stromdichte [125]. Drei der hier untersuchten Bäder enthalten Nickelchlorid. Der qualitativ gleiche Verlauf der Kurven A und B zeigt, dass dies den Betrag der mechanischen Spannungen erhöht [126]. Für das eigene zusatzfreie Bad (Abbildung 5.3 Kurve E) werden bei geringen Stromdichten die geringsten Spannungen erreicht. Durch die geringe organische Verunreinigung sind sogar kleine Druckspannungen möglich. Für die in dieser Arbeit genutzten Prozessparameter nach Tabelle 5.2 werden maximale Spannungsbeträge von 20 MPa erreicht, was für die Schichthaftung unkritisch ist.

5.4 Spezifischer Widerstand

Die Charakterisierung des spezifischen Widerstands erfolgt durch eigene Versuche. Hierfür werden großflächige Nickelproben mit einer Fläche von 19 x 19 mm² gefertigt und durch Messung des Oberflächenwiderstands, sowie der Probendicke auf den spezifischen Widerstand zurückgerechnet. Weiterhin ist ein eigener Messplatz zur Charakterisierung aufgebaut worden. Die Versuche

folgen einem statistischen Versuchsplan, der alle in Tabelle 5.2 aufgelisteten Prozessparameter berücksichtigt.

5.4.1 Aufbau des Messplatzes und Auslegung der Proben

Der spezifische Widerstand ρ von Schichten mit homogener Dicke berechnet sich über den Oberflächenwiderstand R_{\square} und die Schichtdicke d_{Probe} . Nach Valdes lässt sich der Oberflächenwiderstand mittels Vierpunktmessung bestimmen [129]. Sind die vier Kontaktspitzen mit gleichen Abständen in einer Reihe angeordnet, kann durch die beiden äußeren Spitzen ein Strom in die Probe eingeprägt, und der Spannungsabfall zwischen den inneren Spitzen erfasst werden. Hieraus wird der Oberflächenwiderstand berechnet. Der spezifische Widerstand ergibt sich nach Gleichung 5.1 unter der Annahme einer Schicht von unendlicher lateraler Ausdehnung.

$$\rho_{\text{Ni}} = R_{\square} \cdot d_{\text{Probe}} = \frac{\pi}{\ln(2)} \cdot \frac{U_{\text{Vierpunkt}}}{I_{\text{Vierpunkt}}} \cdot d_{\text{Probe}} \approx 4,53 \cdot \frac{U_{\text{Vierpunkt}}}{I_{\text{Vierpunkt}}} \cdot d_{\text{Probe}} \quad (5.1)$$

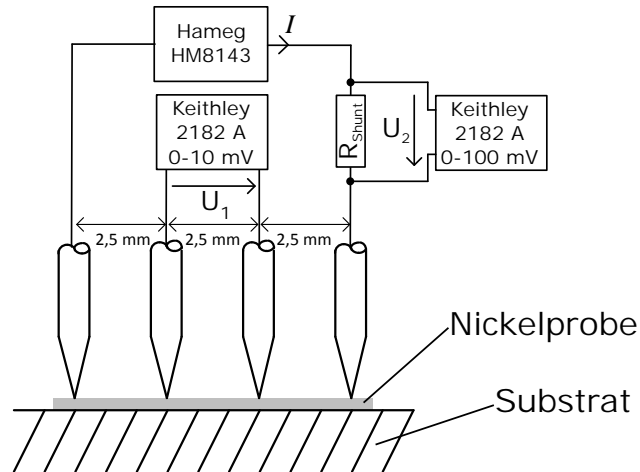


Abbildung 5.4.: Prinzipbild des in dieser Arbeit aufgebauten Vierpunkt-Messsystems für kleine Oberflächenwiderstände bis $40 \text{ m}\Omega/\square$

Für die hier zu charakterisierenden Schichten von $2\text{...}20 \text{ }\mu\text{m}$ Dicke werden Oberflächenwiderstände $<100 \text{ m}\Omega/\square$ erwartet, was den Messbereich kommerzieller Messsysteme, bspw. des SD-510 der NAGY Messsysteme GmbH, unterschreitet. Daher wird ein eigenes Messsystem aufgebaut, das in Abbildung 5.4 als Prinzipbild dargestellt ist. Das Labornetzteil Hameg HM8143 speist den Strom in die äußeren Messspitzen des Messfühlers NAGY SDKR-25 (Breite: 8 mm). Das Nanovoltmeter Keithley 2182 A misst den Strom über einen Mess-Shunt und die an den inneren Messspitzen abfallende Spannung. Das Messsystem verfügt über einen Messbereich bis $40 \text{ m}\Omega/\square$ bei einer Messunsicherheit von $0,007 \text{ m}\Omega/\square$.

Die Messunsicherheit für den spezifischen Widerstand ergibt sich zu $0,002 \text{ }\Omega\text{mm}^2/\text{m}$. Aufgrund der begrenzten Probenabmessungen mit einer Kantenlänge von 19 mm und den damit einhergehenden Reflexionen des Stromdichtefeldes an den Strukturkanten muss der Vorfaktor von $4,53$ in Gleichung 5.1 korrigiert werden. Smits *et. al.* stellen im Jahr 1958 Korrekturfaktoren für eine Vielzahl von Probengeometrien vor [130]. Mit der gegebenen Probengröße reduziert sich der Vorfaktor auf $3,89$. Pro Wafer werden sechs Messwerte der Schichtdicke und 20 Werte des Oberflächenwiderstands bestimmt.

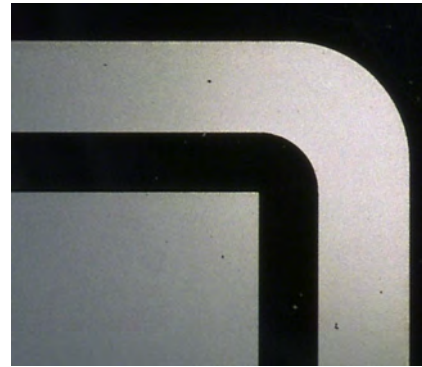
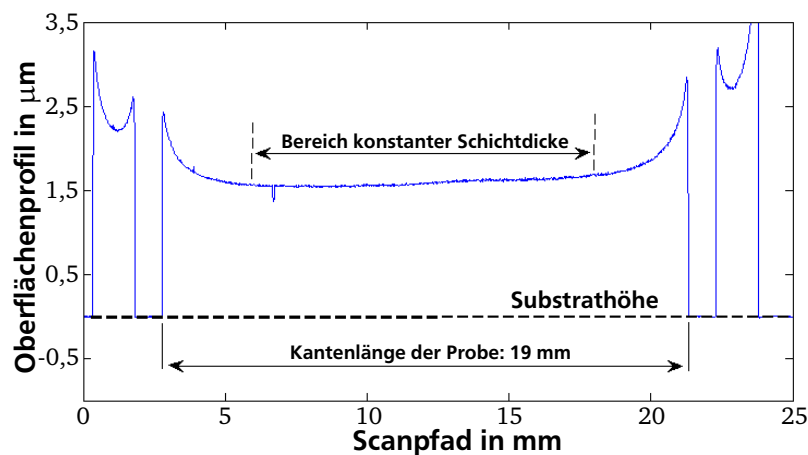


Abbildung 5.5.: Proben zur Bestimmung des spezifischen Widerstands: a) Oberflächenprofil mit auf 14 mm homogener Schichtdicke: $d_{\text{Probe}} = 1,6 \pm 0,1 \mu\text{m}$; b) Draufsicht auf eine gefertigte Probe mit Rand zur Homogenisierung des elektrischen Feldes

Die Schichtdicke der Probe wird mit dem Oberflächenprofilometer Veeco DEKTAK 8 gemessen, das die Bestimmung der Schichtdicke auf 100 nm genau erlaubt. Bei der galvanischen Fertigung der Proben tritt aber zum einen eine Schichtüberhöhung am Strukturrand auf, zum anderen entsteht speziell bei Nickel durch Eigenspannungen der Schicht ein Waferbow, der die Bestimmung der Schichtdicke erschwert. Gerade zur Bestimmung des spezifischen Widerstands ist aber eine über die Breite des Messfühlers homogene Schichtdicke nötig [131]. Daher werden sehr große quadratische Proben mit einer Kantenlänge von 19 mm verwendet. Durch Opferstrukturen in Form eines Randes um die eigentlichen Probenpads wird der laterale Verlauf des elektrischen Feldes, der galvanischen Abscheidung homogenisiert und damit eine in weitem Bereich konstante Schichtdicke ermöglicht. Abbildung 5.5 zeigt das Oberflächenprofil einer Probe mit Rand auf einem glatten Siliziumwafer mit thermischem Oxid. Die Probe hat auf einer Länge von 14 mm die Dicke $d_{\text{Probe}} = 1,6 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$.

Die Proben selbst werden auf insgesamt 59 Wafern in einem UV-LIG-Prozess mit dem Photoresist AZ9260 als Galvanoform gefertigt.

5.4.2 Statistischer Versuchsplan

Nachdem die Voraussetzungen für die Versuchsreihe, ein hinreichend genauer Messplatz und passend ausgelegte Proben, vorhanden sind, können die Versuche selbst geplant werden. Die Reihe wird mit Hilfe der statistischen Versuchsplanung nach *Kleppmann* und der Software Minitab16 dimensioniert [132].

Da kein Vorwissen zum Einfluss der Fertigungsparameter auf den spezifischen Widerstand vorhanden ist, wird ein Screeningplan mit zwei Stufen je Faktor (=Parameter) angewendet. Tabelle 5.2 zeigt, dass acht Parameter zu untersuchen sind, was 256 Einzelversuche nötig machen würde. Nimmt man an, dass Wechselwirkungen zwischen drei oder vier Parametern (z.B. Temperatur, Stromdichte, Schichtdicke und Substratmaterial) vernachlässigbar klein sind, lässt sich der Versuchsplan zu einem fraktionell faktoriellen Plan mit $2^{(8-3)} = 32$ Einzelversuchen reduzieren. Der Versuchsplan gilt damit als „wenig kritisch“. Dabei werden die beiden Dreifaktorwechselwirkungen und die Vierfaktorwechselwirkung durch die neuen Faktoren Pulse-Plating-Frequenz, Anströmung und Kathodenrotation überlagert.

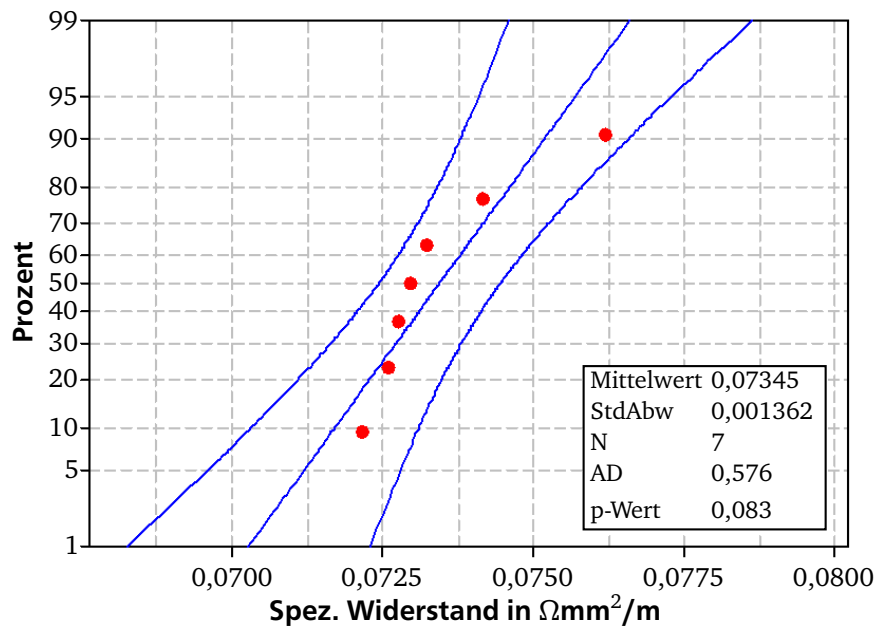


Abbildung 5.6.: Wahrscheinlichkeitsnetz mit einem 95 %-Vertrauensintervall von sieben Nickelproben mit identischen Parametern und einem spezifischen Widerstand von $0,074 \Omega\text{mm}^2/\text{m} \pm 0,0019 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$

Zunächst werden sieben Proben mit gleichen Prozessparametern gefertigt und charakterisiert. Es ergibt sich ein mittlerer spezifischer Widerstand von $0,074 \Omega\text{mm}^2/\text{m} \pm 0,0019 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$. Abbildung 5.6 zeigt die Streuung der Einzelergebnisse um den Mittelwert anhand des Wahrscheinlichkeitsnetzes: Die Werte liegen innerhalb des Vertrauensintervalls von 95 % und dürfen als normalverteilt angenommen werden. Der Versuchsplan ist damit so anwendbar. Mit der Prozessstreuung $\sigma = 0,0019 \Omega\text{mm}^2$ ($=2 \%$) und der insgesamt notwendigen Zahl an Einzelversuchen von $N = 32$ lässt sich der detektierbare Unterschied des Erwartungswerts $\Delta\mu$ nach Gleichung 5.2 berechnen.

$$N = 60 \cdot \left(\frac{\sigma}{\Delta\mu} \right)^2 \rightarrow \Delta\mu = 0,0019 \Omega\text{mm}^2/\text{m} \quad (5.2)$$

Mit $\Delta\mu = 0,0019 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$ ist bei der bereits notwendigen Zahl an Einzelversuchen eine hinreichend kleine Erwartungswertdifferenz bestimmbar. Damit kann der Versuchsplan in dieser Form genutzt werden.

5.4.3 Auswertung der Versuche

Auf insgesamt 59 Wafern werden 32 verwertbare Proben gefertigt und vermessen. Für den spezifischen Widerstand ergeben sich Mittelwerte von $0,065 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$ bis $0,078 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$, was in der Größenordnung von Bulk-Material liegt. Abbildung 5.7 zeigt das Haupteffektdiagramm des spezifischen Widerstands. Auswirkungen auf den spezifischen Widerstand haben vor allem Stromdichte, Pulse-Plating und Substratmaterial. Nach *Maissel* beeinflussen die Anzahl und die Art von Kristalldefekten maßgeblich den elektrischen Widerstand [131]

Betrachtet man die Topologie der unterschiedlich prozessierten Nickelproben in Tabelle 5.3, so bestätigen sich die Schichteigenschaften in den optischen Eindrücken. Je höher Stromdichte und

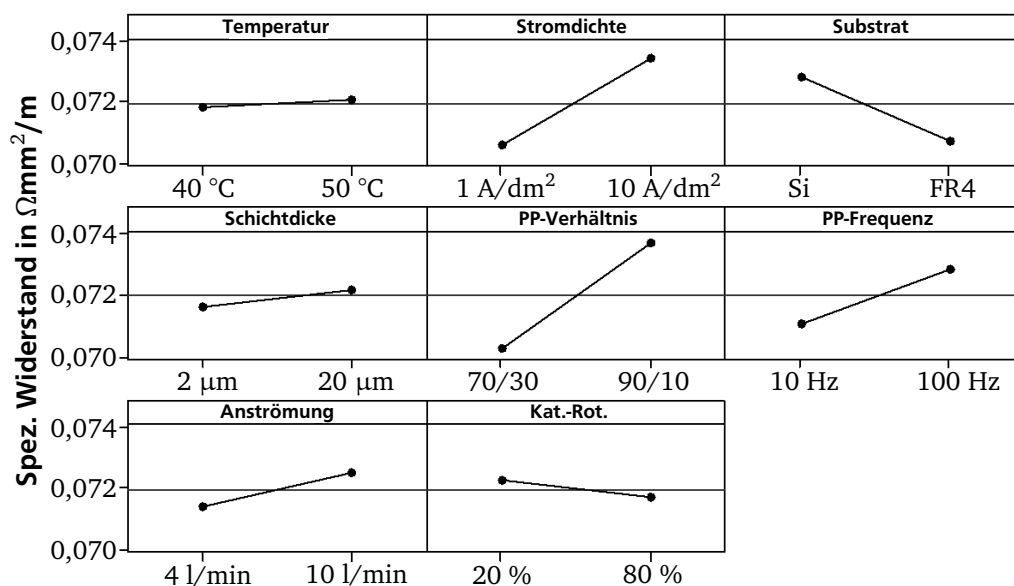


Abbildung 5.7.: Haupteffektdiagramm des spezifischen Widerstands

Schichtdicke sind, desto gröber erscheint die Schichttextur. Dieser Eindruck wird gerade bei dünnen Schichten durch ein raues Substrat verstärkt, da bei Schichtdicken unter 2 µm die Textur der unterliegenden Schichten das galvanische Wachstum dominiert [133]. Erst bei höheren Schichtdicken setzt sich die dem Nickel eigene Textur durch. Schichten mit großem spezifischem Widerstand weisen eine große Rauheit auf, was auf Knötchen durch zu hohe Stromdichte oder eingeschlossene Verunreinigungen hinweist [134].

Tabelle 5.3.: Topologie unterschiedlich prozessierter Nickelproben

Substrat	–	FR4	FR4	Si	Si
Stromdichte	A/dm²	10	1	10	1
Pulse-Frequ.	Hz	100	10	10	10
Puls-Pause-Verh.	–	7/3	7/3	9/1	7/3
Schichtdicke	µm	20	2	2	20
Rauheit	nm	524,7	599,9	41,6	173,3
Spez. Wid.	Ωmm²/m	0,089	0,065	0,059	0,075

Die Versuche zeigen, dass sich die elektrischen Schichteigenschaften durch die Abscheidebedingungen einstellen lassen. Tabelle 5.4 zeigt die Extremwerte der Eigenschaften in Abhängigkeit der Prozessparameter. Dies sind die beiden Sätze von Prozessparametern, die im weiteren Verlauf dieser Arbeit je nach Anwendungsfall für möglichst hohe oder niedrige spezifische Widerstände eingesetzt werden.

Tabelle 5.4.: Abscheideparameter für die Extremwerte des spezifischen Widerstands

Parameter	Einheit	Wert	
spez. Widerstand	$\Omega\text{mm}^2/\text{m}$	0,065	0,078
Temperatur	$^{\circ}\text{C}$	40	50
Stromdichte	A/dm^2	1	10
Puls-Pause-Verhältnis	–	7/3	9/1
Pulse-Plating-Frequenz	Hz	10	100
Anströmung	l/min	4	10
Kathodenrotation	rpm	34	7,6
Schichtdicken	μm	2	20

5.5 Temperaturkoeffizient des spezifischen Widerstands

Im Folgenden wird der Temperaturkoeffizient des spezifischen Widerstands von galvanischem Nickel bestimmt. Als Materialprobe wird ein SUEX-Laminat von 250 μm Dicke nach dem in Kapitel 4.6 bestimmten Fertigungsprozess gefertigt und mittels Galvanoformung mit Nickelstreifen in der Dicke der metallischen Heizer von im Mittel 3 μm beschichtet. Damit entspricht die Probe in ihrer Materialkombination und ihren Schichtdicken dem Verbund aus Heizer und polymerem Dehnungskörper der Mikroaktoren.

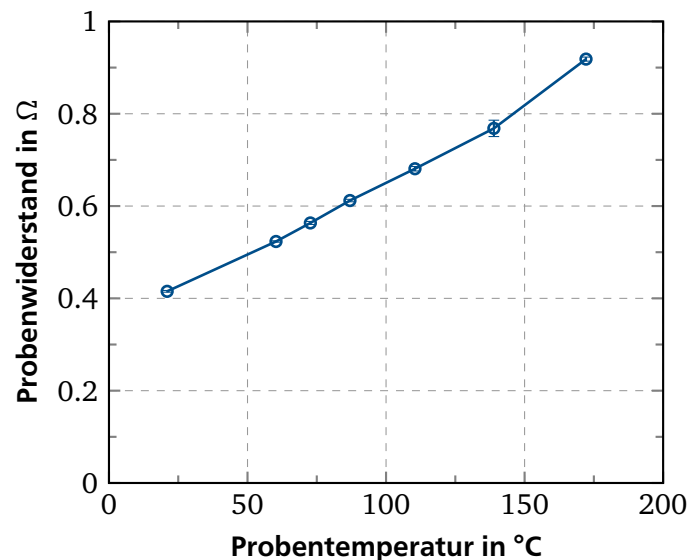


Abbildung 5.8.: Bestimmung des Temperaturkoeffizienten von galvanisch abgeschiedenem Nickel: Elektrischer Widerstand der Probe als Funktion der Temperatur

Die elektrisch-thermische Charakterisierung der Probe erfolgt durch Einprägen eines Stroms und Erfassen der an der Probe abfallenden elektrischen Spannung mittels Vierpunktmessung. Die Probentemperatur wird mittels IR-Kamera gemessen. Für die Versuche kommt die in Kapitel 3.2 vorgestellte Messanordnung, bestehend aus dem Motion-Analyzer [135] zur Bestromung der Probe und der Thermokamera FLIR SC655, zum Einsatz.

Im ersten Schritt des Versuchs wird bei einer elektrischen Leistungen von 0,7 mW und nicht messbarer Erwärmung der Grundwiderstand der Probe auf $R_{20} = 0,44 \Omega$ bestimmt. Durch schrittweises

Erhöhen der Leistung bis zu einer Temperatur von 150°C wird im zweiten Schritt die Proben-temperatur und ihr elektrischer Widerstand in Abhängigkeit der eingeprägten elektrischen Leistung ermittelt. Aus der resultierenden Kurve lassen sich durch Kurvenfit der lineare Anteil α_{20} und der quadratische Anteil β_{20} bestimmen. Abbildung 5.8 zeigt den Betrag des elektrischen Widerstands, aufgetragen über der Proben-temperatur. Die Kurve ist aus sechs Einzelmessungen gemittelt. Die größte Mittelwertabweichung beträgt 2 %.

Der spezifische Widerstand von Nickel ergibt sich zu:

$$\rho(\Delta T) = \rho_{20} \cdot (1 + \alpha_{20} \Delta T + \beta_{20} \Delta T^2) \quad (5.3)$$

$$\rho_{\text{Ni}}(\Delta T) = 0,078 \, \Omega\text{mm}^2/\text{m} \cdot (1 + 5,93 \cdot 10^{-3} \text{K}^{-1} \cdot \Delta T + 0,12 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-2} \cdot \Delta T^2) \quad (5.4)$$

Der quadratische Anteil des Terms ist vernachlässigbar. Der lineare Anteil entspricht sehr gut dem Wert für Bulkmaterial von $6,0 \cdot 10^{-3} \text{K}^{-1}$ [118].

5.6 Zusammenfassung: Materialeigenschaften

Die in diesem Kapitel vorgestellten Untersuchungen zeigen die Abhängigkeit der Werkstoffeigenschaften von galvanisch aus einem Nickelsulfamatbad abgeschiedenen Strukturen von den Abscheidparametern. Aus diesen Abhängigkeiten ergeben sich die in dieser Arbeit verwendeten Sätze von Abscheidparametern nach Tabelle 5.4. Damit ist die Grundlage zur Modellierung und den Entwurf der Mikroaktoren geschaffen. Tabelle 5.5 fasst die Werkstoffeigenschaften zusammen.

Tabelle 5.5.: Werkstoffeigenschaften von galvanisch abgeschiedenem Nickel bei den in dieser Arbeit verwendeten Abscheidparametern im Vergleich zu Werten aus der Literatur (siehe Tabelle 5.1)

Werkstoffeigenschaft	Einheit	eigene Versuche	Bulk-Material
E-Modul	GPa	150	195,5
Zugfestigkeit	MPa	540	370
Intrinsische Spannungen	MPa	<20	–
Spezifischer Widerstand	$\Omega\text{mm}^2/\text{m}$	0,078	0,069
Temperaturkoeffizient	$10^{-3} \cdot 1/\text{K}$	5,93	6,0

6 Modellierung und Entwurf optimierter elektrothermischer Mikroaktoren

In den vorigen Kapiteln werden Fertigungs- und Einsatzgrenzen jener Werkstoffe erarbeitet, die als Konstruktions- und Funktionsmaterialien für elektrothermische Mikroaktoren zum Einsatz kommen. Ausgehend von diesen Eigenschaften ist nun ein Aktorentwurf möglich. Die Diskussion des Stands der Technik in Kapitel 2.4 zeigt weiterhin, dass die Notwendigkeit der indirekten Beheizung des Dehnungskörpers durch einen metallischen Leiter eine Optimierungsmöglichkeit bietet: Durch einen Heizer mit lokal angepasster Heizleistung kann eine Homogenisierung der Betriebstemperatur und damit eine Leistungssteigerung der Aktoren erzielt werden.

Abbildung 6.1a) zeigt den Aufbau des hier zu Grunde liegenden Pseudobimorph-Aktors und die Bezeichnungen. Der heiße und der kalte Balken haben den gleichen Querschnitt und sind durch einen Mittenabstand thermisch und mechanisch entkoppelt. Sie sind an ihrem unteren Ende auf dem Substrat verankert. Die Balken sind an ihrem freien Ende mit einem Kopf verbunden und durch einen Luftspalt vom unterliegenden Substrat freigestellt. Balken und Kopf bilden gemeinsam den Dehnungskörper des Mikroaktors. Der heiße Balken des Dehnungskörpers wird durch den Heizer von seiner Unterseite indirekt geheizt. In Abbildung 6.1b) sind die physikalischen Grundlagen der Aktorfunktion am Beispiel eines infinitesimalen Balkenelements veranschaulicht: Joule'sche Wärmeerzeugung führt mit den Wärmetransportmechanismen Konduktion, Konvektion und Strahlung zu einem Temperaturfeld innerhalb des Balkenelements. Hierzu proportional stellt sich die Wärmeausdehnung des Elements ein. Eine Aufarbeitung der physikalischen Mechanismen der elektro-thermo-mechanischen Wandlung ist in Anhang B dieser Arbeit zu finden.

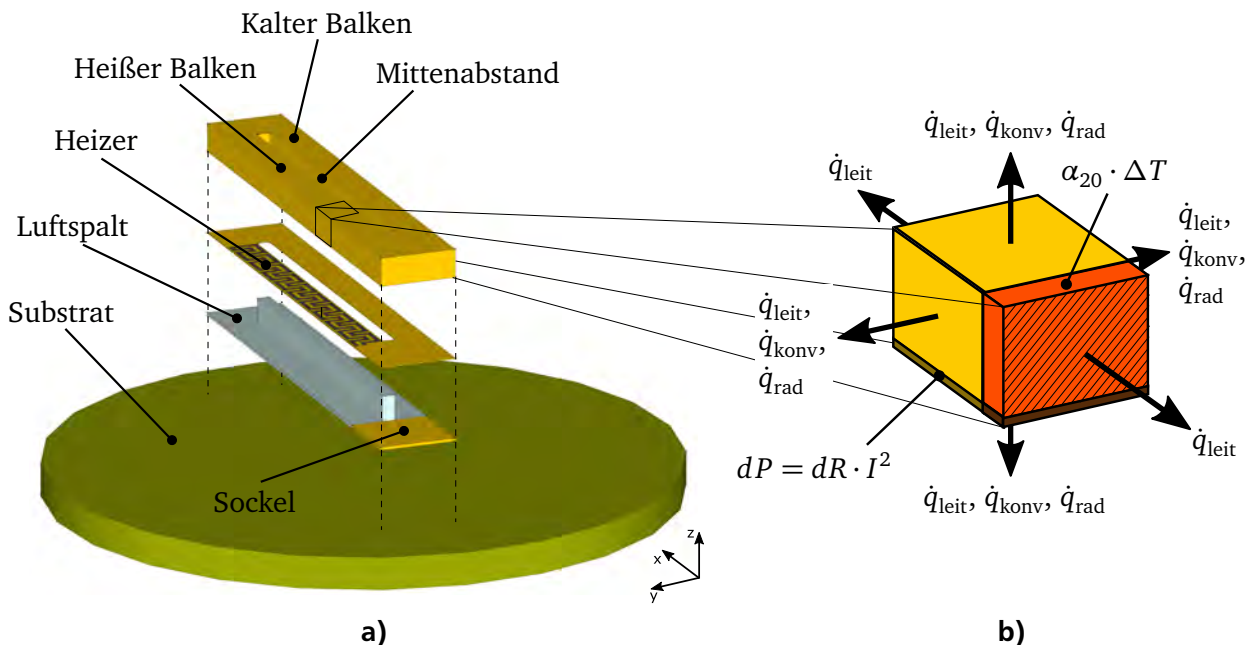


Abbildung 6.1.: Aufbau und Funktion eines Pseudobimorph-Aktors: a) Explosionsdarstellung mit Bezeichnungen; b) Infinitesimales Balkensegment mit Wärmestromanteilen und thermischer Ausdehnung

In den folgenden Abschnitten wird zunächst ein elektrothermisch-mechanisch gekoppeltes FEM-Modell vorgestellt und validiert, das den in Abbildung 6.1a) gezeigten Pseudobimorph-Aktor mit Heizer, Luftspalt und Substrat abbildet. Dies ermöglicht die Untersuchung des Heizers mit dem

Ziel der lokal angepassten Heizleistung. Hieraus folgt eine Homogenisierung der Heizertemperatur entlang des geheizten Balkens und damit die Optimierung eines bestehenden Dehnungskörpers. Der gute Erfolg der Methode erlaubt es abschließend, die Heizergeometrie durch die Annahme einer konstanten Temperatur in der Heizerebene zu vernachlässigen und so auch den Entwurf der Dehnungskörper zu ermöglichen. Das vorgestellte Vorgehen ist auf beliebige indirekt geheizte Balkengeometrien übertragbar und wird hier am Beispiel des in Kapitel 2.4 vorgestellten Referenzaktors demonstriert. Eine Abschätzung der Leistungsfähigkeit optimierter elektrothermischer Mikroaktoren innerhalb der Fertigungsgrenzen am Institut EMK ist in Anhang C dargestellt.

6.1 Elektrothermisch-mechanisch gekoppeltes FEM-Modell

In der Literatur findet man für Mikroaktoren aus SU-8 und anderen Materialien bspw. Nickel einige analytische Modelle [42, 136], hauptsächlich aber gekoppelte FEM-Modelle [22, 40, 137]. Analytische Modelle haben den Vorteil der schnellen, geschlossenen Berechnung, vernachlässigen aber aufgrund der Annahme konzentrierter Bauelemente die Gradienten von Wärmeerzeugung oder Temperaturfeld.

Ob die Gradienten vernachlässigt werden dürfen, lässt sich mit der dimensionslosen Biot-Zahl $Bi = \frac{\alpha l}{\lambda}$ prüfen, einer Relation aus Wärmeübergangskoeffizient α , der charakteristischen Länge l des festen Körpers, hier die zu erwärmende Schichtdicke, und der Wärmeleitfähigkeit λ . Für $Bi \ll 0,1$ ist die innere thermische Leitfähigkeit sehr viel größer als der Widerstand gegenüber der Wärmeabgabe an das umgebende Fluid, so dass von einer gleichförmigen Temperaturverteilung innerhalb des Körpers ausgegangen werden kann [138]. *Eicher* zeigt, dass sich für Mikroaktoren der hier betrachteten Größenordnung Biot-Zahlen $> 0,1$ ergeben, Gradienten also nicht vernachlässigt werden dürfen. *Staab* stellt zur schnellen Aktorauslegung daher ein elastomechanisches Modell mit finiten Balkenelementen auf, das auf analytischem Weg die Temperaturgradienten in der Querschnittsfläche des heißen Balkens berücksichtigt, jedoch die Gradienten entlang des Balkens und eine verteilte Wärmeerzeugung vernachlässigt.

Daher wird im Folgenden ein statisches elektrothermisch-mechanisch gekoppeltes FEM-Modell erarbeitet und in Ansys® Workbench 15.0 implementiert. Dieses bietet den Vorteil, das vollständige Volumenmodell der Aktorgeometrie, wie in Abbildung 6.1 gezeigt, abzubilden. Auch das in den Kapiteln 4 und 5 ermittelte temperaturabhängige Materialverhalten von SU-8 und Nickel kann hinterlegt werden.

6.1.1 Ansatz der Simulation

Im Folgenden werden die Struktur der Simulation, die Aktorgeometrie und die numerischen Parameter erläutert.

Struktur der Simulation

Abbildung 6.2 zeigt das Ablaufdiagramm der benötigten Simulation nach [139] für einen beliebigen Lösungsschritt n . Die Koeffizientenmatrizen (thermische Leitfähigkeit λ , spezifische Leitfähigkeit κ und Steifigkeiten K) der diskretisierten Geometrie sind im linken Teil dargestellt und werden mit den Vektoren der jeweiligen Zielgrößen (Temperatur T , el. Spannung U und Position ξ) multipliziert. Auf der rechten Seite der Gleichungssysteme sind die Randbedingungen der Simulation aufgeführt. Die thermische und die elektrische Domäne sind über die Temperatur T stark gekoppelt.

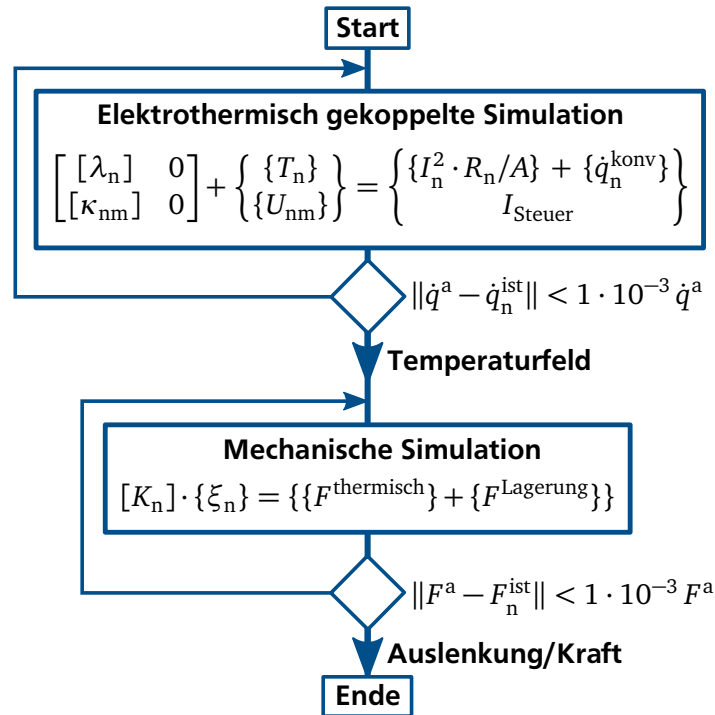


Abbildung 6.2.: Ablaufdiagramm der elektrothermisch-mechanisch gekoppelten Simulation

In der ersten Phase wird die elektrische Domäne in den Unterschritten m gelöst: Der in die Heizergeometrie eingeprägte Steuerstrom I_{Steuer} bewirkt einen Joule'schen Wärmestrom $I_n^2 \cdot R_n/A$, der als Randbedingung in das thermische Gleichungssystem eingeht. Hinzu kommen thermische Randbedingungen, wie z.B. Konvektion an den Außenflächen der Geometrie. Aus dem thermischen Gleichungssystem berechnen sich die Knotentemperaturen. Als Konvergenzkriterium der ersten Phase wird die Übereinstimmung aus berechnetem Wert einer vorgegebenen Größe und der vorgegebenen Größe selbst herangezogen. So darf bspw. der aus der Wärmestromdichte an einer Außenfläche berechnete Konvektionskoeffizient nur um $1 \cdot 10^{-3}$ von vorgegebenen Koeffizienten abweichen. Ist das nicht der Fall, werden die Gleichungssysteme im Schritt $n + 1$ neu gelöst.

Ist thermische Konvergenz erreicht, wird das Temperaturfeld an die mechanische Simulation übertragen, wo es als äußere Last $F^{thermisch}$ zusammen mit der Lagerung der Geometrie $F^{Lagerung}$ eingeht. Nach dem gleichen iterativen Vorgehen werden die Knotenpositionen und daraus, je nach Randbedingung, die Auslenkung und die Kraft der Geometrie bestimmt.

Geometrie und Parametrisierung

Die Aktorgeometrie wird direkt aus den Lithographiemasken für die Herstellung extrudiert und entspricht in seinen lateralen Abmessungen dem aufgebauten System im Detail. Abbildung 6.3 zeigt die bemaßte Geometrie: Der Referenzaktor hat eine beheizte Länge von 4 mm, an der Unterseite des Dehnungskörpers mit 300 µm Dicke ist der mäandrierte Heizer von 2 µm Dicke in den heißen Balken eingebettet. Ein Luftspalt von 15 µm Dicke stellt den Actor vom Substrat frei, der Mittenabstand ist 150 µm breit.

Alle Festkörper werden über Verbundkontakte zu einer quasi monolithischen Baugruppe gefügt. Dies betrifft auch die ruhenden Luftvolumina in Mittenabstand und Luftspalt, die als Festkörper abgebildet modelliert werden. Die Wärmeabgabe in die Umgebung wird durch eine Konvektionsrandbedingung berücksichtigt.

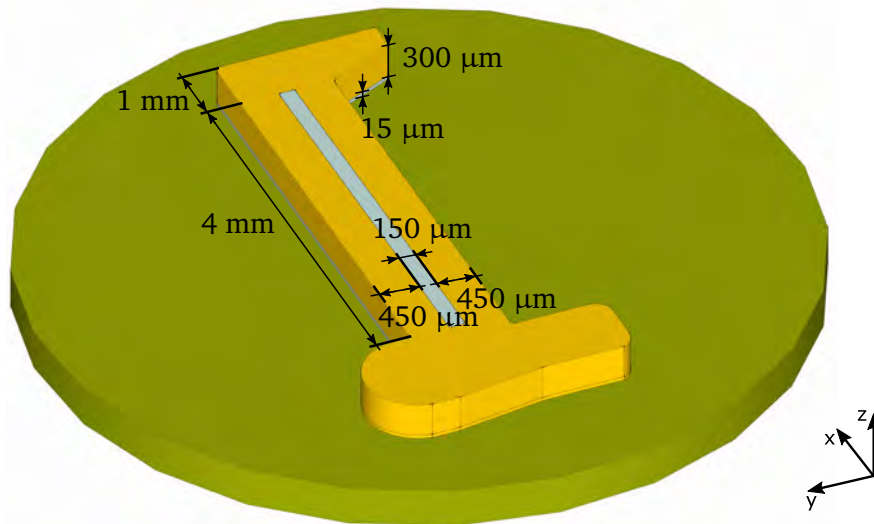


Abbildung 6.3.: Bemaßter Referenzaktor

Die für dieses Modell zu bestimmenden Materialparameter und Koeffizienten sind in Tabelle 6.1 dargestellt.

Tabelle 6.1.: Parameter des FEM-Modells

	SU-8	Nickel	FR4	Luft	Konvektion
Dichte	X	X	X	X	
Thermische Leitfähigkeit	X	X	X	X	
E-Modul	X	X	X		
Ausdehnungskoeffizient	X	X	X		
Spezifischer Widerstand		X			
Temperaturkoeffizient des Widerstands		X			
Konvektionskoeffizient					X

Vernetzung

Die Vernetzung des Modells wird mit dem automatischen Vernetzer von Ansys® Workbench 15.0 unter dem Einsatz einiger Vernetzungsmethoden durchgeführt. Dabei ist ein Multi-Skalen Problem zu lösen: Luftspalt und Heizer sind lateral ausgedehnte, aber dünne Strukturen im Vergleich zu den angrenzenden Geometrien von Substrat und heißem Balken. Da aber die Erzeugung der thermischen Leistung im Modell vom Heizer ausgeht, ist in den dünnen Bereichen mit den größten Gradienten von Wärmestrom und Temperatur zu rechnen. Daher kommt hier die erweiterte Größenfunktion zur Netzverfeinerung über dünnen Spalten zum Einsatz, um für Luftspalt und Heizer zwei Elementlagen zu erzwingen. Der Heizer selbst wird mit einer Sweep-Methode vernetzt: Die Unterseite wird lateral in Rechtecke unterteilt und zur Oberseite hin in ein einlagiges hexaedrisches Netz extrudiert.

Abbildung 6.4 zeigt den vernetzten eingebetteten Heizer mit tetraedrischer Vernetzung (a) und hexaedrischer Vernetzung nach der Sweep-Methode (b). Der Verlust der Strukturhöhe durch De-featuring bei der tetraedrischen Vernetzung ist in Abbildung a) deutlich sichtbar, wogegen die

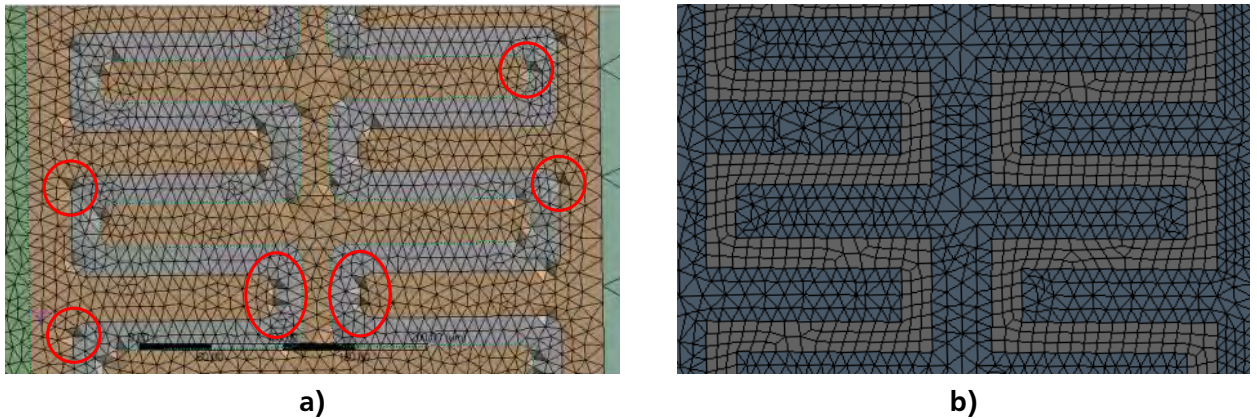


Abbildung 6.4.: Vernetzung des Heizers: a) Tetraedrisch mit sichtbarem Detailverlust in den Ecken; b) Hexaedrisch ohne Detailverlust

Geometrie durch die Sweep-Methode und die daraus folgende Hexaedervernetzung in ihren Details erhalten bleibt.

Die Zielgrößen der Simulation, Maximaltemperatur T_{Max} und Aktorauslenkung ξ , erweisen sich als abhängig von der Feinheit der Vernetzung. In einer Konvergenzanalyse wird diese Abhängigkeit untersucht. Abbildung 6.5 zeigt die Zielgrößen in Abhängigkeit der Knotenzahl. Es zeigt sich ein Sprung bei ca. 3,5 Mio. Knoten, der auf einen Detailverlust bei der Vernetzung der dünnen Spalte zurückgeführt werden kann. Jenseits dieses Sprungs ist keine Abhängigkeit der Ergebnisse von der Vernetzung sichtbar, weshalb die Knotenzahl der Modelle oberhalb von 3,5 Mio. gewählt wird.

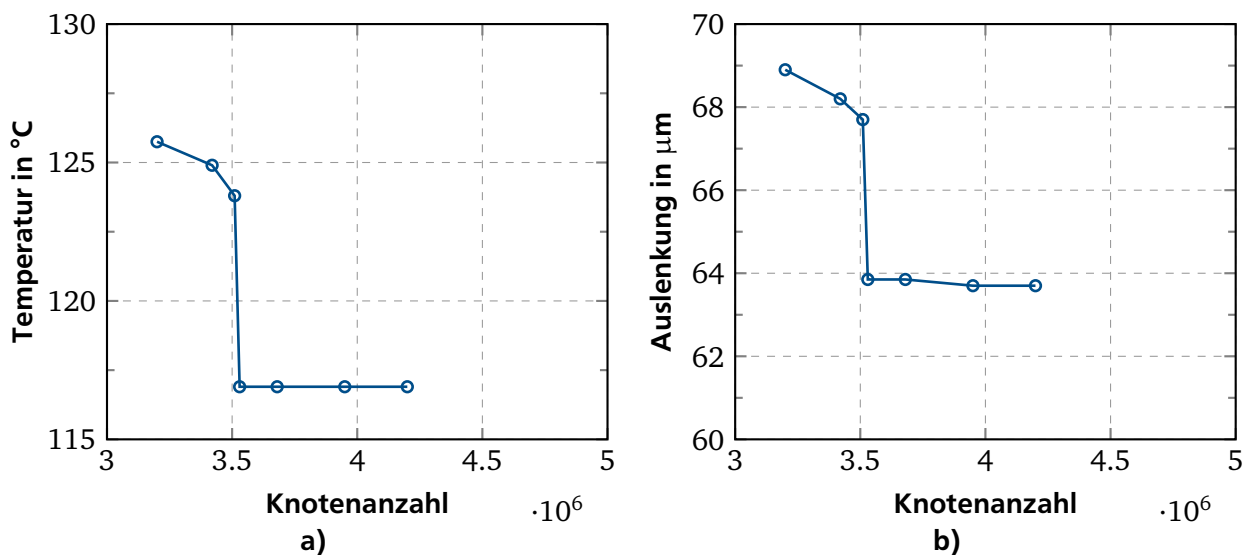


Abbildung 6.5.: Konvergenzanalyse an einem Beispielaktor: a) Maximaltemperatur in Abhängigkeit der Knotenzahl; b) Auslenkung in Abhängigkeit der Knotenzahl

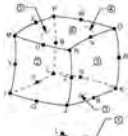

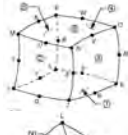

Ansys® erzwingt für die Volumenkörper einer Geometrie das Definieren von mechanischen Materialeigenschaften. Für ruhende Gasvolumina in einer statischen Simulation ist dies physikalisch nicht sinnvoll. Daher werden der elektrothermische und der mechanische Simulationsschritt von einander getrennt. Die Aktorgeometrie muss hierfür zwei Mal importiert und vernetzt werden. So wird es möglich, in der mechanischen Simulation alle Körper zu unterdrücken, die nur im elektrothermischen Schritt gebraucht werden: Substrat, Aktorsockel und Luftspalte. Damit wird die

mechanische Simulation schneller und Behelfslösungen für mechanische Eigenschaften von Gasvolumina sind nicht nötig. Die Vernetzung unter gleichen Randbedingungen stellt sicher, dass beide Netze identisch sind und numerische Fehler beim Übertragen der Knotentemperaturen minimiert werden.

Solver

Für die Lösung des Modells kommen die in Tabelle 6.2 gezeigten Elemente zum Einsatz. Sie bieten quadratische Ansatzfunktionen für die thermische und die mechanische Domäne. Damit sind sie für die vollständige Simulation geeignet [140].

Tabelle 6.2.: Im FEM-Modell verwendete Elemente nach [139]

Geometrie	Elementtyp	Element	Abgebildete Größen	Knotenzahl
Nur elektrothermische Simulation				
Heizer	SOLID226		thermisch und elektrisch	20
Außenflächen	SURF152		Konvektionskoeffizient	8
Elektrothermische und elektrothermisch-mechanische Simulation				
Heizer	SOLID186		thermisch und mechanisch	20
Sonstige Körper	SOLID187		thermisch und mechanisch	10

Zur Lösung der in Kapitel 6.1.1 gezeigten Gleichungssysteme kommt bei Ansys ein iterativer Solver nach dem Newton-Raphson-Verfahren zum Einsatz. Zwar stehen für lineare Gleichungssysteme andere, effizientere Solver zur Verfügung, jedoch sind die vorliegenden Gleichungssysteme durch die starke Kopplung von elektrischer und thermischer Domäne sowie durch die Berücksichtigung von großen mechanischen Verformungen nichtlinear. Im Folgenden wird die Funktionsweise des Solvers erläutert.

Gleichung 6.1 zeigt ein beispielhaftes Gleichungssystem für eine Zelle. Dabei entspricht $[K]$ einer beliebigen Koeffizientenmatrix, $\{u\}$ stellt den Vektor der Zielgröße dar, $\{F^a\}$ bildet die Randbedingungen als äußere Lasten ab.

$$[K] \cdot \{u\} = \{F^a\} \quad (6.1)$$

Für einen Iterationsschritt n wird die linke Seite von Gleichung 6.1 für einen geschätzten Anfangsvektor $\{u_n\}$ gelöst und daraus die innere Last $\{F_n^i\}$ berechnet (Gleichung 6.2). Ist die Konvergenz noch nicht erreicht, bleibt eine Differenz zwischen inneren und äußeren Lasten. Hieraus lässt sich eine Restabweichung der Zielgröße $\{\Delta u_n\}$ berechnen (Gleichung 6.3). Diese dient, zusammen mit

den aktuellen Startwerten $\{u_n\}$, als neuer Anfangsvektor $\{u_{n+1}\}$ für die nächste Iteration (Gleichung 6.4). Als Konvergenzkriterium dient die Differenz zwischen inneren und äußeren Lasten, die um nicht mehr als $1 \cdot 10^{-3}$ von der Randbedingung abweichen darf (Gleichung 6.5).

$$[K_n] \cdot \{u_n\} = \{F_n^i\} \quad (6.2)$$

$$[K_n] \cdot \{\Delta u_n\} = \{F^a\} - \{F_n^i\} \quad (6.3)$$

$$\{u_{n+1}\} = \{u_n\} + \{\Delta u_n\} \quad (6.4)$$

$$\|F^a - F_n^i\| < 1 \cdot 10^{-3} F^a \quad (6.5)$$

6.1.2 Modellierung der Festkörper

Nach dem Festlegen der numerischen Randbedingungen gilt es, die Parameter des Modells zu bestimmen. Dies betrifft zunächst die Eigenschaften der Festkörper aus SU-8, galvanisch abgeschiedenem Nickel und FR4.

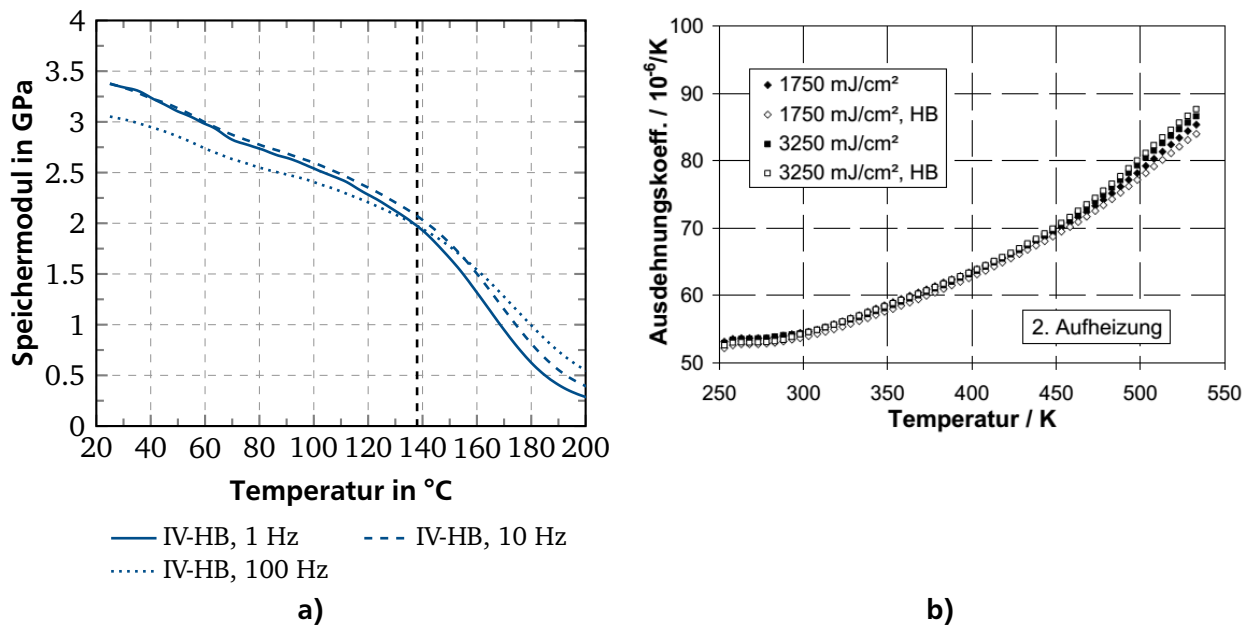


Abbildung 6.6.: Nichtlineare Eigenschaften von SU-8: a) Temperaturabhängigkeit des Speichermoduls nach Kapitel 4.4; b) Nichtlinearer thermischer Ausdehnungskoeffizient nach Eicher [8]

Für SU-8, bzw. seine Trockenlaminatvariante SU-EX, sind die Dichte, der Elastizitätsmodul, der thermische Ausdehnungskoeffizient sowie die thermische Leitfähigkeit zu hinterlegen. In Kapitel 4 wird die Abhängigkeit des komplexen Elastizitätsmoduls von der Materialtemperatur experimentell untersucht. Da die Temperatur von 120 °C als Betriebsgrenze für SU-8 mit deutlichem Abstand von der Glasübergangstemperatur angenommen wird, können viskoelastische Eigenschaften vernachlässigt und der Speichermodul als äquivalent zum Elastizitätsmodul angesehen werden. Der temperaturabhängige Verlauf des Speichermoduls wird in die Werkstoffmodellierung aufgenommen. Ebenso

wird das von *Eicher* untersuchte nichtlineare Verhalten des thermischen Ausdehnungskoeffizienten tabellarisch hinterlegt [8]. Abbildung 6.6 zeigt die zugehörigen Diagramme. Die Dichte und die thermische Leitfähigkeit sind in der Literatur verfügbar. Tabelle 6.3 fasst die für die Simulation nötigen Parameter mit Quellenangaben zusammen.

Für **galvanisch abgeschiedenes Nickel** werden die mechanischen und elektrischen Eigenschaften benötigt. Sie werden in Kapitel 5 dieser Arbeit experimentell untersucht und in die Materialmodellierung übernommen. Die Dichte, der Wärmeausdehnungskoeffizient, die thermische Leitfähigkeit und die spezifische Wärme sind in der Literatur untersucht. Tabelle 6.3 fasst die für die Simulation relevanten Daten mit Quellenangaben zusammen.

Die Angaben für **FR4** sind vollständig der Literatur entnommen und ebenfalls in Tabelle 6.3 dargestellt.

Tabelle 6.3.: Materialdaten der Festkörper für die elektrothermisch-mechanisch gekoppelte Simulation

	Dichte	E-Modul	Therm. Ausd.-koeff.	Therm. Leitf.	Spez. Wid.	Temp.-koeff.
	in g cm^{-3}	in GPa	in $10^{-6}/\text{K}$	in W/mK	$\Omega\text{mm}^2/\text{m}$	$10^{-3}/\text{K}$
SU-8	1,2 nach [54]	3,5..2,3 siehe Abb. 6.6a)	52...62 siehe Abb. 6.6b)	0,2 nach [40]		
Nickel	8,908 nach [141]	150 nach [119]	13,4 nach [141]	91 nach [141]	0,078	5,93
FR4	2,0 nach [142]	25 nach [142]	15 nach [143]	0,36 nach [143]		

6.1.3 Thermische Modellierung

Zur Modellierung des Wärmetransports in die Luft sind ruhende und nicht ruhende Luftvolumina zu unterscheiden. Die Vorgänge in den dünnen Spalten von Mittenabstand und Luftspalt sind anders zu bewerten und zu modellieren, als die in der umgebenden Luft. Die Wärmetransportmechanismen sind dabei für alle Volumina gleich und unterscheiden sich aber in ihrer Wirkung:

- Konduktion:

Unter Wärmeleitung versteht man den Energietransfer zwischen zwei Orten eines Körpers oder eines ruhenden Fluids, hervorgerufen durch einen Temperaturgradienten. Die physikalische Ursache sind Gitterschwingungen. Die charakteristische Eigenschaft des temperaturleitenden Mediums ist die thermische Leitfähigkeit λ

$$\dot{q}_{\text{leit}}(x,t) = -\lambda \nabla T(x,t) \quad (6.6)$$

- Konvektion: Der Wärmeübergang bei der Konvektion ist mit einer Relativbewegung zwischen Körper und strömendem Fluid verbunden, man spricht auch von Wärmemitführung durch ein strömendes Fluid. Der Energietransport zwischen den Fluidmolekülen findet dabei dennoch durch Konduktion statt. Man unterscheidet zwischen erzwungener Konvektion

durch Fluidbewegung und freier Konvektion, die auf die Gravitation oder Dichteunterschiede zurückzuführen ist. Charakteristische Größe ist der Konvektionskoeffizient α_{konv} .

$$\dot{q}_{\text{konv}} = -\alpha_{\text{konv}}(T - T_{\infty}) \quad (6.7)$$

- Wärmestrahlung:

Jeder Festkörper mit endlicher Temperatur emittiert über seine Oberfläche als grauer Strahler elektromagnetische Strahlung, die sich nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz als Emission eines Wärmestroms modellieren lässt. Sie wird durch den Wärmeübergangskoeffizienten $\alpha_{\text{rad}}(T)$ beschrieben.

$$\dot{q}_{\text{rad}} = \alpha_{\text{rad}}(T) (T - T_{\infty}) \quad (6.8)$$

Die beiden Fälle des ruhenden und des freien Gasvolumens bei Mikrosystemen werden im Folgenden diskutiert.

Wärmetransportmechanismen im Mikrobereich

Für den Wärmetransport in dünnen Luftspalten mit **ruhenden Gasvolumina**, zeigt *Eicher* [8] anhand der Grashof-Zahl, dass Konduktion dominiert: Mit einer Grashof-Zahl von $9,4 \cdot 10^{-3} \ll 1$ für elektrothermische Mikroaktoren der hier betrachteten Größenordnung kann Konvektion in Luftspalt und Mittenabstand vernachlässigt werden.

Die Quantifizierung des Wärmetransports in die **freie Umgebung** wird in der Literatur kontrovers diskutiert. Mit Blick auf die von *Eicher* bestimmte Grashof-Zahl herrscht Konduktion vor, bestimmt aber in eigenen Versuchen bei elektrothermischen Mikroaktoren aus SU-8 einen Konvektionskoeffizient α_{konv} von ca. $125 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$. Die analytischen Berechnungen von *Mahony* zeigen die Ausbildung eines konduktiven Nahfelds und konvektiven Fernfelds [144]. Experimentelle Untersuchungen von *Lewandowski* zeigen die Abhängigkeit des Konvektionskoeffizienten vom Aspektverhältnis der emittierenden Geometrie [145]. *Liang* bestätigt ebenfalls eine geometrieabhängige Skalierung des Koeffizienten [146]. Die Untersuchungen von *Hill* an Nickelstrukturen in der Größenordnung der hier betrachteten Aktoren [147], *Geisbergers* Modellierung von elektrothermischen Mikroaktoren aus Poly-Silizium [148], *Peirs* Untersuchungen an Mikroaktoren mit Formgedächtnisdrähten [149], sowie die Versuche von *Maginelli* [150] und *Jain* [151] kommen durch das Modellieren verschiedener Geometrien in der Größenordnung der hier betrachteten Mikroaktoren zu stark unterschiedlichen Ergebnissen und empfehlen Konvektionskoeffizienten im Bereich $35 \dots 1100 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$.

Besonders interessant sind die Ergebnisse von *Hu et al.*, der die Temperaturänderung eines Aluminiumheizers bei Normaldruck untersucht und die Unabhängigkeit seiner Versuchsergebnisse von der Orientierung der Probe im Erdschwerefeld zeigt [152]. Dies belegt das Vorherrschen von Konduktion an der Probenoberfläche, da sich Konvektion durch die auftretende Schlotwirkung mit der Probenorientierung ändert. Weiterhin modelliert *Hu* seine Versuchsergebnisse in einer gekoppelte FEM-Simulation auf zwei Arten: Die Probe wird zunächst von einem großen Volumenkörper aus Luft mit der thermischen Leitfähigkeit von $0,0262 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ umgeben, danach wird anstelle des Volumenkörpers ein Konvektionskoeffizient von $30,4 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ angenommen. Beide Modellierungsansätze stimmen untereinander und mit den Versuchsergebnissen gut überein.

Dies zeigt zum einen, dass die wirkenden Wärmetransportmechanismen auf unterschiedliche Weisen, aber mit dem selben Erfolg, in einem Modell abgebildet werden können.

Aus der Diskussion folgt für das vorliegende Modell:

- Die Luft in den dünnen Spalten darf mit reiner Konduktion modelliert werden. Die Leitfähigkeit von Luft beträgt nach einer Metastudie von *Kadoya* $0,0262 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ [153]. Dieser Wert wird in das Modell übertragen, die Dichte von Luft wird mit $1,15 \text{ kg m}^{-3}$ aus der Literatur entnommen.
- In der Literatur lassen sich Konvektionskoeffizienten im Bereich $35 \dots 1100 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ finden. Die Geometrieabhängigkeit des Koeffizienten wird dabei häufig betont. Aufgrund der kontroversen Diskussion sind eigene Versuche zur Bestimmung des Koeffizienten notwendig.
- Eine Berücksichtigung der Wärmestrahlung konnte in der Literatur nicht gefunden werden. In der Praxis ist es bei Normaldruck meist möglich, aber auch nicht nötig, Wärmestrahlung und Konvektion zu trennen, besonders bei experimenteller Bestimmung des Übergangskoeffizienten [154]. Die Wärmestrahlung wird daher im weiteren Verlauf der Arbeit nicht als eigener Transportmechanismus berücksichtigt und die Wärmeabgabe in die freie Umgebung in einem gemeinsamen Emissionskoeffizienten $\alpha_{\text{Emission}} = \alpha_{\text{konv}} + \alpha_{\text{rad}}$ modelliert.

Experimentelle Bestimmung des Emissionskoeffizienten

Für die experimentelle Bestimmung des Emissionskoeffizienten wird zunächst die elektrisch-thermische Charakterisierung eines mikrostrukturierten SU-8 – Nickelverbundes in der Größe der Mikroaktoren vorgenommen. Die Geometrie wird anschließend in Ansys® nachgebildet und der Koeffizient durch Fitten der Simulationsergebnisse auf die Messdaten numerisch bestimmt.

Messmethode

Die elektrisch-thermische Charakterisierung der Proben erfolgt durch das Einprägen eines Stroms und das Erfassen der an der Probe abfallenden elektrischen Spannung, sowie der Probentemperatur. Hieraus lassen sich die aufgenommene Leistung und der elektrische Widerstand der Probe in Abhängigkeit ihrer Oberflächentemperatur bestimmen. Für die Versuche kommt die in Kapitel 3.2 vorgestellte Messanordnung, bestehend aus dem am Institut EMK entwickelten Motion-Analyzer [135] zur Bestromung der Probe und die Vierpunktmessung der Spannung, sowie die Thermokamera FLIR SC655 zum Einsatz.

Abbildung 6.7 zeigt die schematische Versuchsanordnung mit streifenförmigen Nickelproben auf freistehenden SU-8-Balken. Die Proben werden in horizontaler und vertikaler Orientierung vermessen. Die horizontale Orientierung entspricht der späteren Aktoranordnung im Substratverbund, die vertikale Orientierung dient dem Nachweis der Konvektion: Steigt die erwärmte Luft entlang der vertikalen Probenoberfläche aus, so kann von unten kältere Luft nachströmen (Kamineffekt) und die Probe effektiver kühlen, als bei horizontaler Lage. Daher ist bei der vertikal orientierten Probe mit einer geringeren Temperatur bei gleicher Leistung zu rechnen.

Im ersten Schritt der Versuche wird bei kleinen elektrischen Leistungen und vernachlässigbarer Erwärmung der Grundwiderstand der Probe bestimmt. Durch schrittweises Erhöhen der Leistung bis zu einer Temperatur von 130°C wird anschließend das Temperaturverhalten der Probe ermittelt.

Probenfertigung und Versuchsdurchführung

Für den Versuch wird eine $250 \text{ }\mu\text{m}$ dicke SU-8-Schicht strukturiert und mittels Galvanoform mit Nickelstreifen in der Dicke der metallischen Heizer von ca. $2 \text{ }\mu\text{m}$ beschichtet. Damit entspricht die Probe in ihrer Materialkombination und ihren Schichtdicken dem Verbund aus Heizer und Dehnungskörper der Mikroaktoren. Abbildung 6.8a) zeigt die gefertigte Probe.

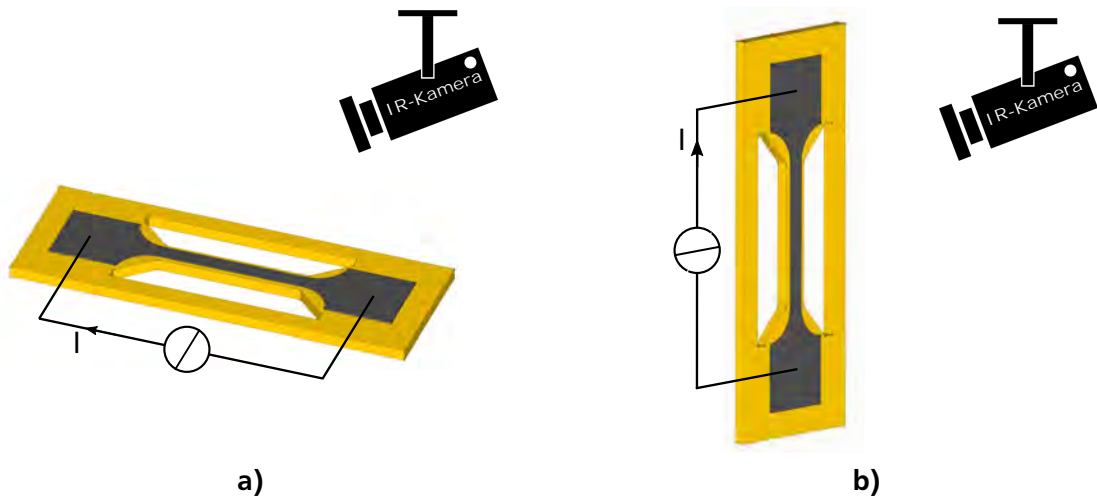


Abbildung 6.7.: Untersuchte Probenorientierungen: a) horizontal; b) vertikal

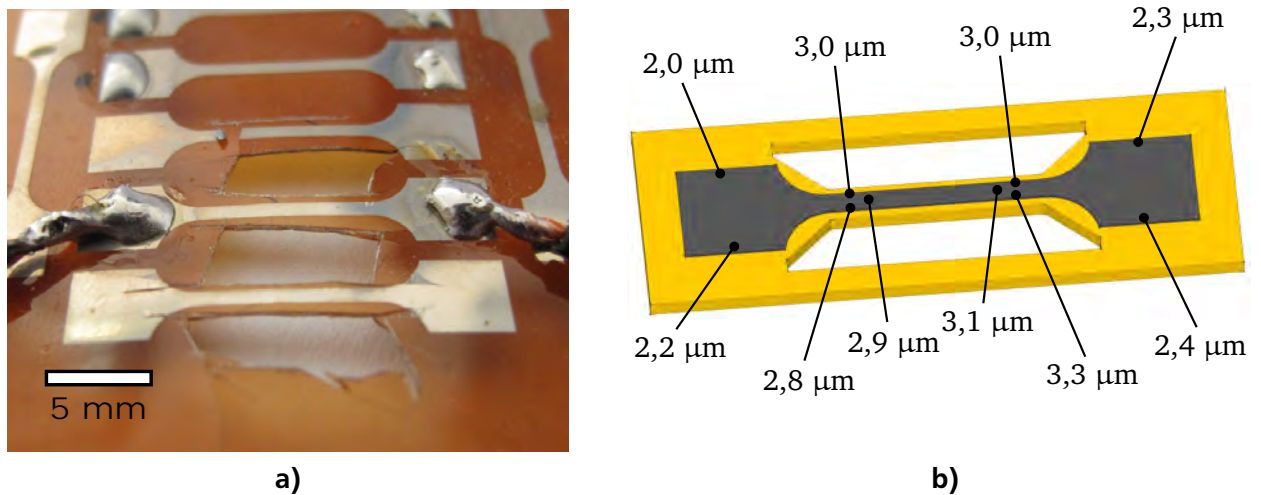


Abbildung 6.8.: Schulterstabförmige Nickelstreifen auf freigeschnittenen SU-8-Balken zur Bestimmung des Emissionskoeffizienten: a) Gefertigte und kontaktierte Probe; b) Oberflächenprofil, gemessen mit dem Oberflächenprofilometer VEECO Dektak 8

In Abbildung 6.8b) ist das Ergebnis der Schichtdickencharakterisierung mit dem Oberflächenprofilometer VEECO Dektak 8 zu sehen. Es zeigt sich eine Spanne der Schichtdicke von 2,0...3,1 μm und das für Galvanoformung typische Profil der Schichtdickenüberhöhung in dünnen Spalten und an der Kante der Galvanoform (siehe hierzu auch Kapitel 5). Das Schichtprofil ist proportional zur Verteilung des Stromdichtefelds während der Abscheidung.

Die Proben werden über Lötunkte kontaktiert und an den Messaufbau angeschlossen. Mit einem sehr kleinen Strom von 40 mA wird zunächst der Grundwiderstand bestimmt, dann mit Strömen bis zu 550 mA die Leistung so lange erhöht, bis eine Maximaltemperatur von 140 °C erreicht ist. Für beide Fälle werden zehn Messzyklen durchgeführt. In Abbildung 6.9 sind die gemittelten Verläufe von elektrischer Leistung und Temperatur mit Fehlerbalken (klein, daher kaum zu sehen) über dem eingprägten Strom (a), sowie der aus diesen Rohdaten abgeleitete Verlauf der Maximaltemperatur über der elektrischen Leistung (b) dargestellt.

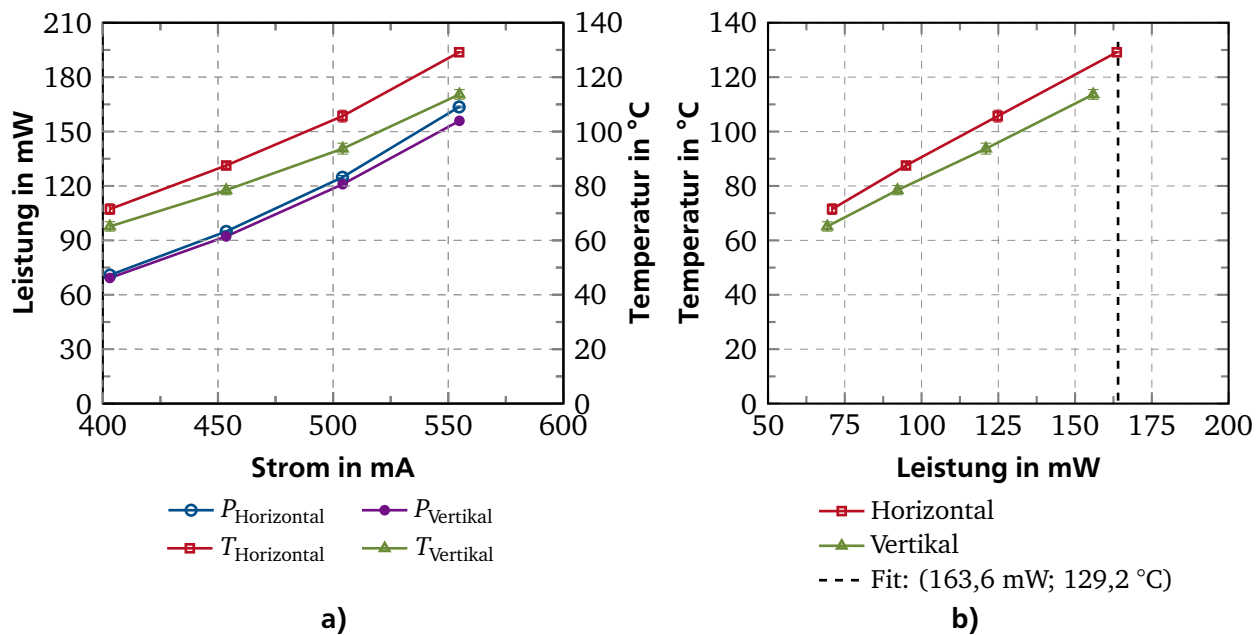


Abbildung 6.9.: Temperaturverhalten der Nickelproben, gemittelt über zehn Messungen: a) Aufgenommene Rohkurven von Leistung und Temperatur in Abhängigkeit des eingprägten Stroms; b) Abgeleiteter Verlauf der Maximaltemperatur über der eingprägten Leistung

Diskussion der Ergebnisse

Abbildung 6.9a) zeigt die erwartete quadratische Abhängigkeit von Leistung und Temperatur. Die über 10 Einzelwerte gemittelten Messungen weisen eine sehr kleine Streuung $< 2\%$ auf.

Es zeigt sich, dass der Kurvenverlauf von der **Probenorientierung** abhängig ist. Für die vertikal orientierten Proben ist bei gleicher Leistung die resultierende Oberflächentemperatur um ca. 10 % niedriger, als bei den horizontalen Proben. Der Wärmeabtransport ist also im vertikalen Fall größer. Damit ist gezeigt, dass bei dieser Größenordnung und Betriebstemperatur der Mikroaktoren die Wärmeemission nicht auf reiner Konduktion basiert, sondern ebenfalls Konvektion vorliegt. Es folgt ebenfalls, dass bei der Modellierung, aber auch im Betrieb elektrothermischer Aktoren auf ihre Orientierung im Raum zu achten ist.

Numerische Bestimmung des Emissionskoeffizienten

Die in Abbildung 6.8 gezeigte Probengeometrie wird mit dem bereits vorgestellten FEM-Modell modelliert und ihr Temperaturverhalten simuliert. Dabei werden die SU-8-Balken und die Nickelstreifen als Festkörper modelliert und analog zur Messung ein Strom zur Beheizung der Probe eingpräggt. In einem ersten Simulationsschritt mit sehr geringem Strom und vernachlässigbarer Erwärmung wird der Grundwiderstand der Probe ermittelt. Das in Abbildung 6.8b) gezeigte inhomogene Oberflächenprofil des Nickelstreifens wird dabei mit einer konstanten Schichtdicke von $2,5\ \mu\text{m}$ angenommen.

Mit Blick auf Kapitel 6.1.1 stellt der Emissionskoeffizient α_{Emission} die letzte Unbekannte des Modells dar und wird im Rahmen der aus der Literatur entnommenen Werte von $25 \dots 125\ \text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$ variiert. Ziel ist eine möglichst gute Übereinstimmung der Simulation mit dem in Abbildung 6.9b) markierten Datenpunkt bei 163,6 mW und $129,2\ ^\circ\text{C}$ für die horizontale Probenorientierung.

In Abbildung 6.10a) ist der simulierte Verlauf von Leistung und Temperatur in Abhängigkeit des Emissionskoeffizienten aufgetragen. Die beste Übereinstimmung bei Maximaltemperatur mit ei-

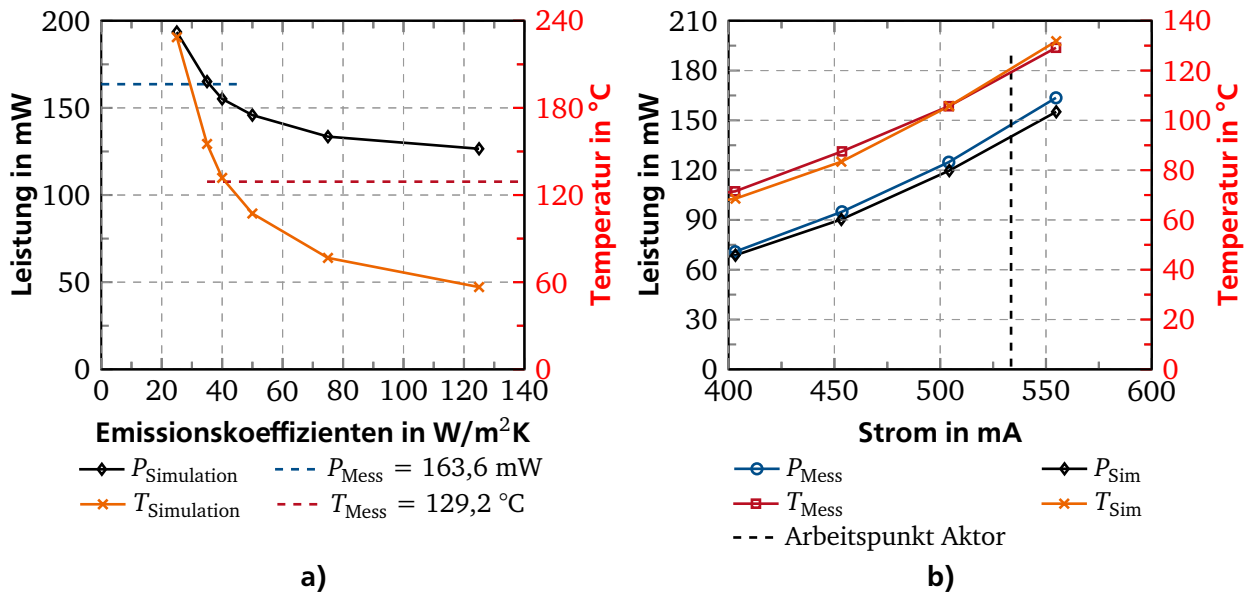


Abbildung 6.10.: Anpassen der simulierten Werte auf die Messdaten: a) Verlauf von simulierter Leistung und Temperatur in Abhängigkeit des Emissionskoeffizienten α_{Emission} ; b) Verläufe von gemessener Leistung und Temperatur im Vergleich zur Simulation mit $\alpha_{\text{Emission}} = 40 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$

ner Abweichung von Leistung und Widerstand $< 7\%$ und der Temperatur von $< 3\%$ ergeben sich für einen Koeffizienten $\alpha_{\text{Emission}} = 40 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$. Abbildung 6.10b) zeigt die simulierten Verläufe von Leistung und Temperatur im Vergleich zu den Messwerten. Der simulierte Grundwiderstand weicht um $\sim 1\%$ von den Messwerten ab, bei Nenntemperatur von 120°C ist eine systematische Abweichung der Leistung nach unten um ca. 7% sichtbar. Dies kann dem inhomogenen Oberflächenprofil der Probe zugeschrieben werden, das sich im FEM-Modell nicht nachstellen lässt. Durch die abfallende Schichtdicke der Probe aus der Mitte nach außen ergibt sich ein Widerstandsgradient, der eine breitere Temperaturverteilung und damit ein stärkeres Aufheizen zur Folge hat (siehe Abbildung 6.8). Der resultierende Emissionskoeffizient stimmt gut mit den Messdaten überein und entspricht in seinem Betrag der Mehrzahl der Werte aus der Literatur.

6.1.4 Verifikation des elektrothermisch-mechanisch gekoppelten FEM-Modells

Nachdem alle Parameter des Modells bestimmt sind, kann die Verifikation des vollständigen elektrothermisch-mechanischen FEM-Modells anhand eines elektrothermischen Mikroaktors nach Abbildung 6.3 erfolgen. Hierfür wird ein elektrothermischer Mikroaktor messtechnisch charakterisiert. Mit dem am Institut EMK vorhandenen Motion-Analyzer [135] und der IR-Kamera FLIR SC655 werden die statischen Aktorkennwerte elektrische Leistung, maximale Oberflächentemperatur und Leerlaufauslenkung bestimmt. Der Mikroaktor wird in der FEM-Simulation modelliert und die entsprechenden Kennwerte simuliert. Tabelle 6.4 zeigt die Werte und Abweichungen.

Für jede der drei Domänen des elektrothermischen Mikroaktors wird eine gute Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation erreicht. Dabei wird die Leistung um ca. 4% überschätzt, die Auslenkung um ca. $3,5\%$ unterschätzt. Die Überschätzung der Leistung kann dem nicht exakt für diese Geometrie bestimmten Konvektionskoeffizienten oder einer nicht näher untersuchten Abhängigkeit der Leitfähigkeit von Luft zugeschrieben werden. Der Grund für die Unterschätzung der Auslenkung kann im thermischen Ausdehnungskoeffizienten von SU-8 gefunden werden, der

Tabelle 6.4.: Verifikation des FEM-Modells: Vergleich von gemessenen und simulierten Aktorkennwerten

	El. Leistung in mW	Abw. in %	Temperatur in °C	Abw. in %	Auslenkung in μm	Abw. in %
Messung	141,3		100,2		54,8	
Simulation	146,5	3,9	99,2	-0,8	52,9	-3,5

aus der Literatur entnommen wird. Analog zu den in Kapitel 4 gefundenen Prozessabhängigkeiten, ist dies auch für den thermischen Ausdehnungskoeffizienten zu erwarten.

Weiterhin können Fertigungstoleranzen, wie z.B. die Schwankung der Opferschicht- oder SU-8-Dicken, in der Simulation nicht berücksichtigt werden, sodass immer mit einer Abweichung zwischen Modell und charakterisiertem System zu rechnen ist. Gerade die Unterschätzung der Auslenkung resultiert später in einer leichten Überdimensionierung der Mikroaktoren und schränkt die Nutzbarkeit des Modells nicht ein. Trotz der kleineren Abweichungen ist das hier erarbeitete Modell hinsichtlich der Geometrie und der Materialeigenschaften das genaueste dem Autor bekannte und beruht auf einer konsequent erarbeiteten physikalischen Grundlage. Daher wird es im weiteren Verlauf dieser Arbeit in dieser Form verwendet.

6.2 Optimierung der Mikroaktoren durch Homogenisierung der Betriebstemperatur

Mit dem im vorigen Kapitel hergeleiteten Modell können die Mikroaktoren mit einer homogenen Heizerstruktur nach Abbildung 6.11 nun analysiert und optimiert werden. Abbildung 6.11b) zeigt die Temperaturverteilung in der Heizerebene des Referenzaktors. Es zeigt sich ein deutlicher Abfall der Temperatur an den Balkenenden. Durch das Material des Dehnungskörpers ist die maximale Betriebstemperatur der Aktoren begrenzt. Das Ziel der Aktoroptimierung ist daher, die Maximaltemperatur auf möglichst weiten Bereichen des heißen Balkens zu erreichen.

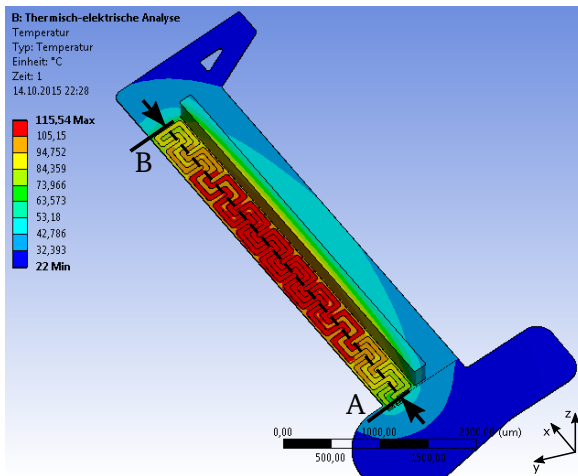
Grund für die inhomogene Temperaturverteilung des Referenzaktors ist der Heizer, der ein sich wiederholendes Muster mit fester Größe aufweist. In jedem Muster wird die gleiche elektrische Leistung entlang des geheizten Balkens erzeugt. Die thermische Leitfähigkeit des Dehnungskörpers nimmt jedoch in Richtung von Kopf und Sockel des Aktors zu und die Temperatur damit ab. Durch einen der thermischen Leitfähigkeit angepassten Heizer lässt sich die Temperaturverteilung homogenisieren.

Im Folgenden wird zunächst die thermische Leitfähigkeit der Aktorgeometrie analysiert, Heizermuster diskutiert und ein verbesserter Heizer ausgelegt. Abschließend wird der optimierte Aktor dem Referenzdesign gegenübergestellt.

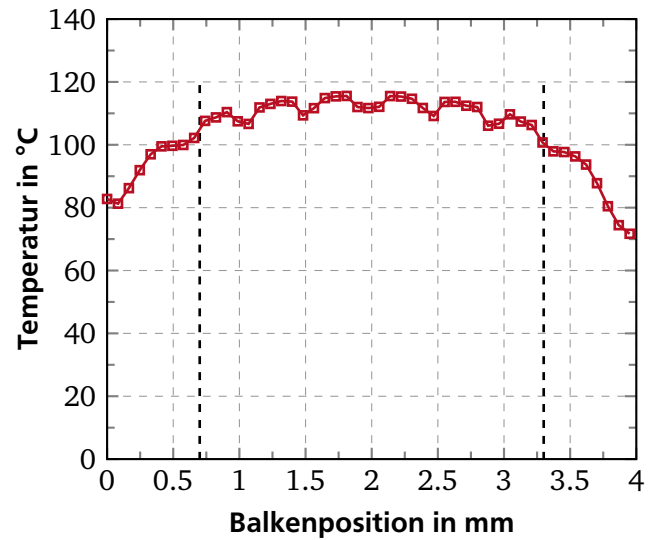
6.2.1 Lokale thermische Leitfähigkeit des geheizten Balkens

Betrachtet man ein Segment ΔA_{Heiz} des geheizten Balkens und beaufschlagt es an seiner Unterseite mit einer konstanten Temperatur, ergibt sich die in Abbildung 6.12a) gezeigte Verteilung der Wärmestromdichte. Abbildung 6.12b) zeigt den auf den Maximalwert normierten Verlauf der Leitfähigkeit entlang des heißen Balkens.

In der Heizerebene entsteht an der Balkenposition x durch Joule'schen Wärmeenergieerzeugung der Wärmestrom $\Delta \dot{Q}_{\text{el}}$. Der Heizer ist dabei innerhalb des geheizten Segments mit der Fläche $A_{\text{Heiz}}(x)$

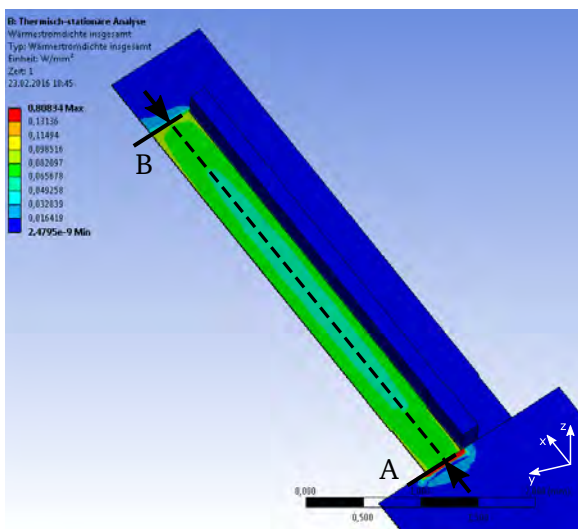


a)

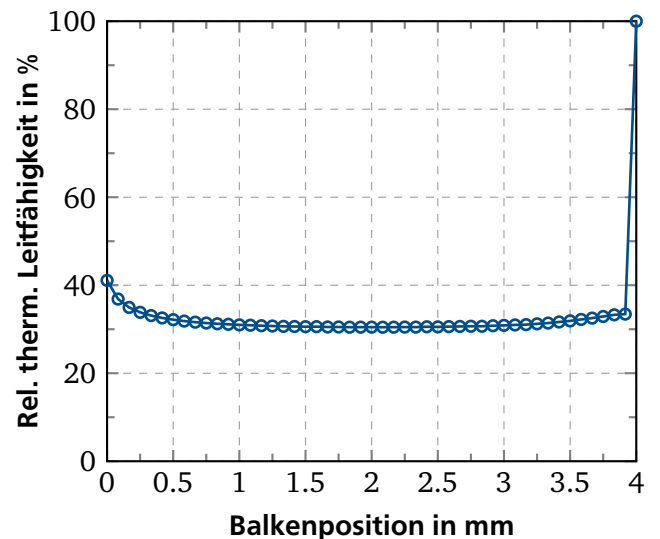


b)

Abbildung 6.11.: Analyse der Aktorgeometrie mit Hilfe des FEM-Modells: a) Simulierte Heizertemperatur des Referenzaktors; b) Verlauf der Temperatur in der Heizerebene (Pfad A-B) mit deutlichem Temperaturverlust im Bereich der Balkenenden



a)



b)

Abbildung 6.12.: Geometrieanalyse: a) Simulierte Verteilung der thermischen Leitfähigkeit in der Heizerebene; b) Normiertes Profil der thermischen Leitfähigkeit in der Heizerebene (Pfad A-B) als Vorschrift zur Heizerauslegung

mäandriert und bedeckt die Leiterbahnfläche $A_{\text{Leiter}}(x)$. Fasst man alle von dem geheizten Segment an der Stelle x abfließenden Wärmeströme zu einer gesamten thermischen Leitfähigkeit λ_{ges} zusammen, so ergibt sich mit der Joule'schen Wärmezeugung und dem Fourier-Gesetz die Gleichung 6.9. In Gleichung 6.11 wird die elektrische Leistung $\Delta P_{\text{el}}(x)$ in Strom und Widerstand aufgelöst.

$$\Delta P_{\text{el}}(x) = \Delta \dot{Q}_{\text{el}}(x) = -A_{\text{Heiz}}(x) \lambda_{\text{ges}}(x) \nabla T(x) \quad (6.9)$$

$$\frac{\Delta P_{\text{el}}(x)}{A_{\text{Heiz}}(x)} = -\lambda_{\text{ges}}(x) \nabla T(x) \quad (6.10)$$

$$\frac{I_{\text{el}}^2 R_{\text{Muster}}(x)}{A_{\text{Heiz}}(x)} = -\lambda_{\text{ges}}(x) \nabla T(x) \quad (6.11)$$

$$\underbrace{I_{\text{el}}^2 \frac{\rho(T)}{b_{\text{Leiter}} d_{\text{Leiter}} b_{\text{Heiz}}}}_{= \text{const.}} \underbrace{\frac{l_{\text{Leiter}}(x)}{l_{\text{Heiz}}(x)}}_{\triangleq \text{Heizermuster}} = \underbrace{-\lambda_{\text{ges}}(x)}_{\text{aus FEM}} \underbrace{\nabla T(x)}_{= \text{const.}} \quad (6.12)$$

Für den statischen Fall besteht auf dem betrachteten Segment eine konstante Temperatur bei konstantem Strom und bekanntem spezifischen Widerstand $\rho(T)$. Damit lassen sich die konstanten von den veränderlichen Termen zu Gleichung 6.12 trennen. Es zeigt sich, dass die lokale Wärmeleitfähigkeit der Geometrie proportional zur lokalen Leistungsdichte des Heizers, genau genommen zum Quotienten aus Leiterbahnfläche und Gesamtfläche, ist.

Postuliert man, dass $\nabla T(x) = \text{const.}$ für den ganzen heißen Balken, erhält man ein thermisches Leitfähigkeitsprofil $\lambda(x)$, dem die Leistungserzeugung des Heizers entsprechen muss. Dann ist eine konstante Temperatur, das Optimierungsziel, erreicht.

Das thermische Leitfähigkeitsprofil des geheizten Balkens kann dem FEM-Modell entnommen werden, ist mit seinen Absolutwerten aber nicht aussagekräftig. Wichtig ist nur die Relation der Werte. Weisen zwei Balkensegmente eine um Faktor zwei unterschiedliche thermische Leitfähigkeit auf, so müssen die dort angebrachten Heizer auch eine um den gleichen Faktor unterschiedliche Leistung abgeben. Daher werden die beiden Profile normiert, und damit direkt vergleichbar. Dieser geometriespezifische Verlauf wird im Folgenden als **relatives thermisches Leitfähigkeitsprofil** bezeichnet und ist in Abbildung 6.12b) für den Referenzaktor dargestellt.

Die Leistungserzeugung eines geheizten Segments bestimmt sich aus der Relation der Länge des heizenden Leiters zur Länge des Segments: $l_{\text{Leiter}}/l_{\text{Heiz}}$. Die maximale Leistungserzeugung des Heizers bestimmt sich aus den technologischen Randbedingungen der Heizerfertigung. Auf diesen Maximalwert wird der Quotient $l_{\text{Leiter}}/l_{\text{Heiz}}$ normiert. Diesen relativen Werten entspricht nun direkt die relative Leistungsdichte eines Heizersegments. Damit dient das relative thermische Leitfähigkeitsprofil direkt als Auslegevorschrift für den Heizer.

6.2.2 Heizermuster

Nachfolgend werden verschiedene Heizer diskutiert. Die sich wiederholenden Leiterbahnanordnungen werden als Muster bezeichnet. Um eine Auswahl zu treffen werden die folgenden Kriterien herangezogen. Das Muster soll

- klein sein, um das relative thermische Leitfähigkeitsprofilen gut auflösen zu können
- eine geringe Steifigkeit besitzen, um die thermische Dehnung des Aktors wenig zu behindern
- geringe Kerbspannungen aufweisen, die zum Ermüdungsbruch des Heizers führen

- eine gute Homogenität der Temperaturverteilung haben, um eine lateral gleichmäßige Durchheizung zu gewährleisten

Abbildung 6.13 zeigt einige Heizler aus der Literatur. Diese werden häufig zur Heizung von quadratischen Strukturen, z.B. Platten, eingesetzt und lassen sich nur schwer in anpassbare Muster für langgestreckte Strukturen einteilen. Sie sind daher für diese Arbeit nicht nutzbar.

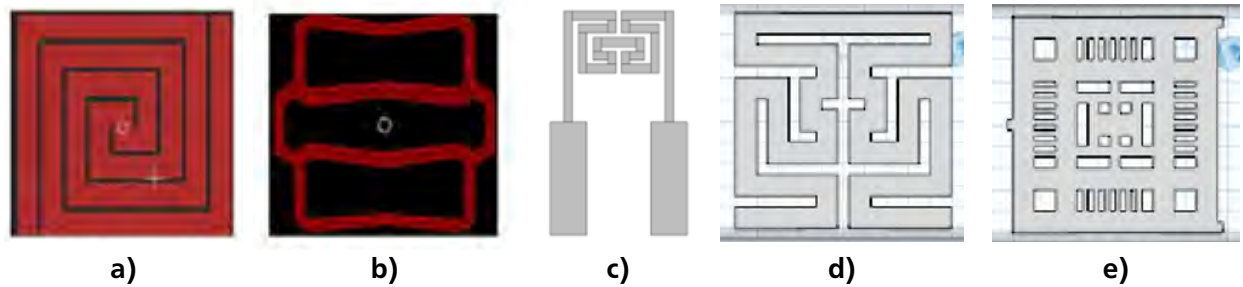


Abbildung 6.13.: In der Literatur verwendete, aber hier nicht näher betrachtete Heizermuster: a) „Doppelspirale“ nach [155]; b) „Wabe“ nach [155]; c) „Fan Shape“ nach [156]; d) „Fan Shape“ nach [157]; e) „Square Shape“ nach [157]


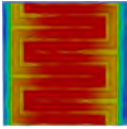

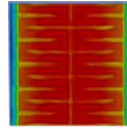
Für langgestreckte Balken kommen klassische einfach oder doppelt verschleifte Mäander zum Einsatz, wie sie in Tabelle 6.5 dargestellt sind. Die beiden Mäanderformen werden mit zwei Leiterbahnbreiten untersucht: Einmal mit einer Breite von $50\ \mu\text{m}$, was dem Standardprozess auf rauen Substraten entspricht, und einmal mit einer Breite von $20\ \mu\text{m}$ nach dem optimierten Fertigungsprozess. Die vier Varianten werden mittels FEM-Simulationen untersucht. Hierzu werden sie auf einem Segment mit der Fläche von $400 \times 400\ \mu\text{m}^2$ angeordnet, auf eine Dicke von $2\ \mu\text{m}$ extrudiert und von SU-8 der gleichen Dicke umgeben. Dies entspricht der Anordnung im Mikroaktor und stellt die Vergleichbarkeit zwischen den Varianten her.

Zur Bestimmung der **Steifigkeit** des Materialverbunds wird ein Zugversuch simuliert. Jedes Muster wird in Längsrichtung einseitig eingespannt und bis zu einer maximalen Längung von $4\ \mu\text{m}$ mit einer Kraft beaufschlagt. Dies entspricht bei dieser Segmentfläche der Bruchdehnung von reinem SU-8 und stellt die maximal mögliche mechanische Zugbelastung dar.

Die **Homogenität der Temperatur** wird durch eine thermische Simulation mit den in Kapitel 6.1.4 ermittelten Randbedingungen bestimmt. Dabei werden die Muster durch Leistungseinkopplung auf eine Maximaltemperatur von $120\ ^\circ\text{C}$ gebracht. Die Homogenität lässt sich dann durch die Differenz von maximaler und mittlerer Temperatur auf der Segmentfläche quantifizieren. Tabelle 6.5 zeigt die Ergebnisse der Simulation.

Die Variante „Einfach Opt.“ zeigt sich im Vorteil. Die geringe Leiterbahnbreite von $20\ \mu\text{m}$ und die bei einfacher Verschleifung doppelte Länge der Bahnen im Vergleich zum Einzelmäander haben eine deutlich kleinere Steifigkeit und vor allem stark reduzierte Kerbspannungen in den Innenecken des Musters zur Folge. Dies lässt sich mit den Gleichungen der Elastomechanik nach [158] erklären. Nimmt man zum einen die quer liegenden Bahnen des Mäanders als beidseitig eingespannte Biegebalken an, werden sie durch die thermische Dehnung des Segments in eine s-förmige Biegelinie gestreckt. Da der überliegende Dehnungskörper die Längsdehnung vorgibt, erfahren die Querbahnen der einfach verschleiften Mäander nur ein Viertel der Auslenkung, verglichen zu den doppelt verschleiften Mustern. Entsprechend reduzieren sich die Kerbspannungen. Zudem hängt die Quersteifigkeit der Leiterbahnen in der dritten Potenz von ihrer Breite ab, was sich in der reduzierten Steifigkeit des Segments zeigt.

Tabelle 6.5.: Vergleich verschiedener Mäandermuster

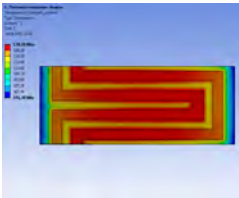
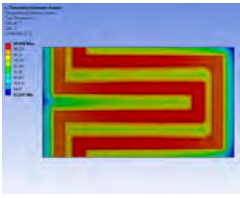
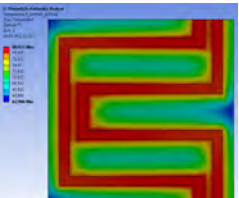
Eigenschaften	Einheit	Einfach Std.	Einfach Opt.	Doppelt Std.	Doppelt Opt.
					
Segmentfläche	μm^2	400 x 400			
Leiterbahndicke	μm	2			
Max. Temperatur	$^{\circ}\text{C}$	120			
Leiterbahnbreite	μm	50	20	50	20
Min. Musterlänge	μm	400	160	200	80
Steifigkeit	N/mm	22,3	6,8	22,5	17,0
Max. Spannung	MPa	1500	80	1900	840
Mittlere Temp.	$^{\circ}\text{C}$	115,9	117,2	117,0	117,13

Hinsichtlich der Temperaturhomogenität ergeben sich nur vernachlässigbare Unterschiede, die enger verschliffen Muster sind jedoch leicht im Vorteil. Die Untersuchung der Varianten zeigt, dass die geringe Leiterbahnbreite von 20 μm besser für die Mäander geeignet ist. Die geringste mechanische Belastung erfährt der einfach verschliffte Mäander. Eine besonders genaue Anpassung an das thermische Leitfähigkeitsprofil des geheizten Balkens ist aufgrund der kleineren Länge durch den Doppelmäander möglich.

6.2.3 Auslegung des optimierten Heizers und Vergleich mit der Referenzgeometrie

Das im vorigen Kapitel ausgewählte Heizermuster wird nun angepasst, um das in Kapitel 6.2.1 ermittelte thermische Leitfähigkeitsprofil abbilden zu können. Hierzu wird seine Breite konstant gehalten und das Muster längs auseinander gezogen, um seine Leistungsdichte $A_{\text{Leiter}}/A_{\text{Heiz}}$ einzustellen. Tabelle 6.6 zeigt drei hier untersuchte typische Längsstufen mit den zugehörigen Kennwerten. Hierfür werden die Muster mit gleicher Leistungsdichte geheizt und die resultierenden Temperaturen ermittelt.

Tabelle 6.6.: Vergleich von Musterlängen und Temperaturen bei gleicher Leistungsdichte

Eigenschaften	Einheit	Min. Länge	Mittl. Länge	Max. Länge
				
Musterlänge	μm	160	230	400
Max. Temperatur	$^{\circ}\text{C}$	120,3	100,0	80,9
Min. Temperatur	$^{\circ}\text{C}$	101,4	83,0	62,9
Rel. Leistungsdichte	%	100	76,0	52,6

Es zeigt sich der erwartete Rückgang der maximal erreichten Temperaturen mit der Musterfläche, aber auch ein Rückgang der Homogenität. Bei großen Mustern, unterhalb einer relativen Leistungsdichte von 75 %, sind die unbeheizten Flächen sehr groß.

Das relative thermische Leitfähigkeitsprofil und die relative Leistungsdichte der Heizermuster werden aufeinander angepasst und so der Heizer ausgelegt. Abbildung 6.14a) zeigt das relative Profil, die relativen Leistungsdichten der Heizermuster und die resultierende Heizergeometrie mit dem Namen „Typ C“. Die thermische Leitfähigkeit nimmt am Sockel des Aktors stark zu, was auf die große Wärmeabgabe in den Aktorsockel im Gegensatz zur umgebenden Luft zurückzuführen ist. Entlang des geheizten Balkens werden relative Leistungsdichten des Heizers von nur ca. 30 % nötig, was angesichts der vorangegangenen Überlegung zur Temperaturhomogenität innerhalb der Muster zu wenig ist. Daher wird das relative Leitfähigkeitsprofil zu Gunsten der Homogenität manuell angepasst und der überhöhte Wert am Fuß des Aktors auf den Startwert des Verlaufs am Kopf des Aktors gesetzt. Dies ergibt das in Abbildung 6.14b) gezeigte korrigierte Profil. Der damit ausgelegte Heizer trägt die Bezeichnung „Typ D“. Es ist zu erwarten, dass die Homogenität der Temperatur entlang des gesamten Balkens zu Gunsten der Temperaturhomogenität am einzelnen Muster leiden wird.

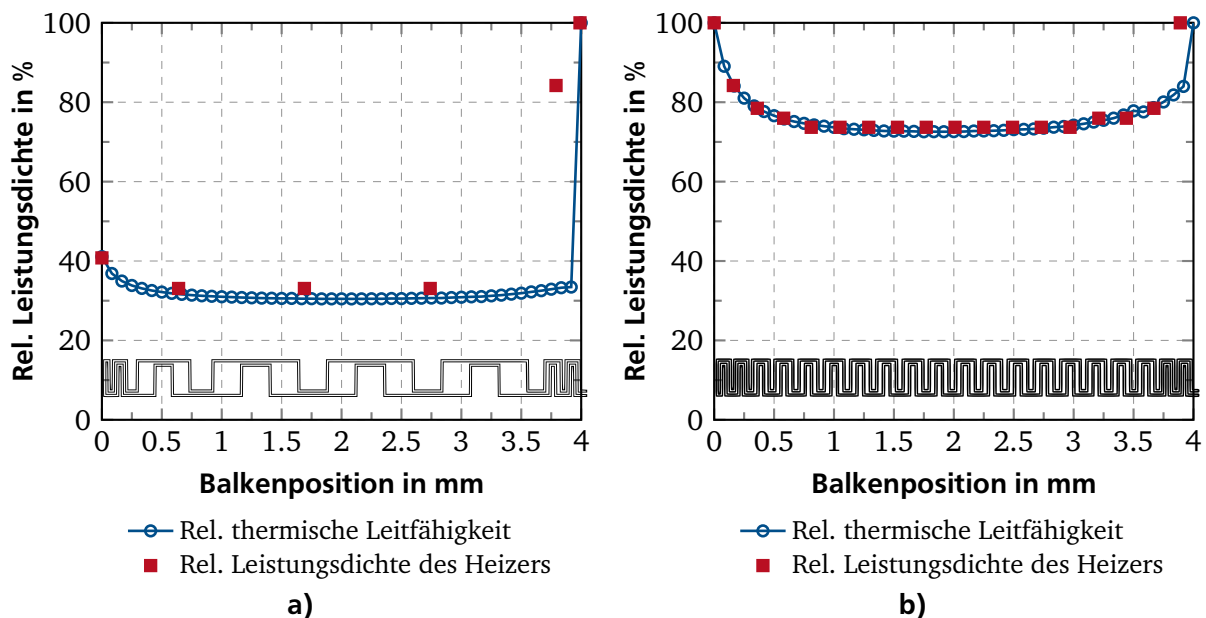


Abbildung 6.14.: Relatives thermisches Leitfähigkeitsprofil der Aktorgeometrie, Verteilung der relativen Leistungsdichten der Heizer und Heizergeometrie: a) „Typ C“; b) „Typ D“

Beide Varianten werden mit dem FEM-Modell simuliert und mit dem Referenzaktor „Referenz“ verglichen. Tabelle 6.7 zeigt die Simulationsergebnisse: Die Temperaturverteilung des Heizers als Bild, und die Werte der aufgenommenen elektrischen Leistung, der maximalen und der mittleren Temperatur in der Heizerebene, die Leerlaufauslenkung, die Out-of-Plane-Auslenkung und die Blockierkraft. Um die Varianten vergleichen zu können, sind die Simulationen auf die maximale Betriebstemperatur von 120 °C eingestellt. Dies entspricht der in Kapitel 4 festgesetzten Maximaltemperatur von SU-8.

Der Vollständigkeit halber sind hier auch zwei Aktorvarianten mit optimiertem Heizer aufgeführt, die mit noch unvollständiger Auslegungsmethode entstanden sind. Diese Aktoren weisen bereits verbesserte Eigenschaften und werden im nachfolgenden Kapitel überwiegend zur Charakterisierung des Aktorverhaltens herangezogen. Die Variante „Typ A“ wurde in der Projektarbeit von *Noronha*

[234] entwickelt. Die Variante „Typ B“ wurde auf der Konferenz Actuator2014 erstmals vorgestellt [219].

Wie in der Diskussion der Heizermuster (siehe Abbildung 6.14) erwartet, ist die Temperaturhomogenität der sehr großen Muster in der Variante „Typ C“ zu gering und führt zu keiner Verbesserung. Die korrigierte Variante „Typ D“ weist dagegen im Vergleich zum Referenzaktor eine um 17 % verbesserte Leerlaufauslenkung und eine um 11 % verbesserte Blockierkraft auf. Der Gewinn an Homogenität in der Heizfläche ist in Tabelle 6.7 gut zu sehen. Der Gewinn an Leerlaufauslenkung fällt größer aus, als der Gewinn an Blockierkraft. Dies ist auf die im optimierten Design reduzierte Eigensteifigkeit des Heizers zurückzuführen, die den Aktor besonders für den am stärksten gedehnten Fall der Leerlaufauslenkung weniger hemmt. Betrachtet man die Out-of-Plane-Auslenkung, so fällt diese bei den optimierten Aktoren sehr gering aus und kann vernachlässigt werden. Beim Referenzaktor ist die Out-of-Plane-Auslenkung negativ, was ebenfalls auf die höhere Steifigkeit des Heizers zurückzuführen ist. Durch die Dehnung des Polymers oberhalb des steifen Heizers bildet sich ein Biegemoment aus, das zur Absenkung des Aktorkopfs, bis hin zum Aufsetzen auf dem Substrat, führt.

Abbildung 6.15 zeigt die Kraft-Weg-Kennlinien und die Temperaturverteilungen in der Heizerebene für die drei Varianten im Vergleich und bestätigt den Gewinn an Leistungsfähigkeit durch die neuartige Auslegungsmethode.

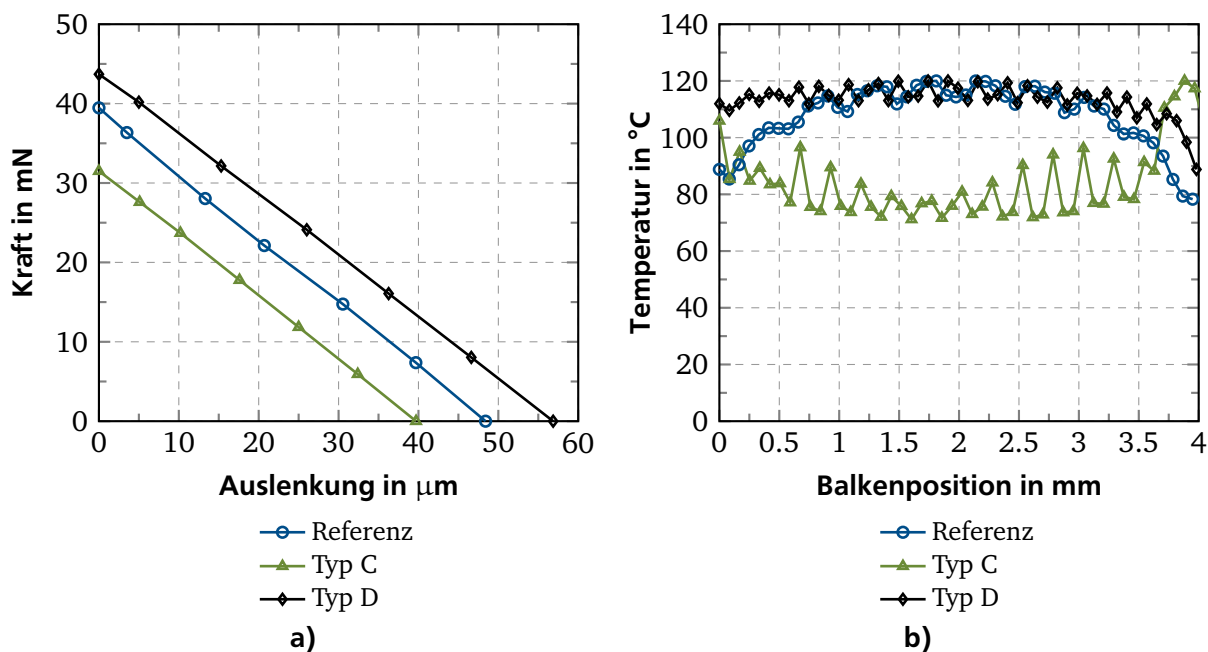


Abbildung 6.15.: Simulatorischer Vergleich der Aktordesigns: a) Kraft-Weg-Diagramm; b) Temperaturverteilung entlang der Unterseite des heißen Balkens

6.2.4 Vereinfachung des Simulationsansatzes zum Aktorentwurf

Die durch die Optimierung erreichte große Homogenität der Heizertemperatur ermöglicht es, die Heizergeometrie durch die Annahme der konstanten Temperatur in der Heizerebene zu vernachlässigen und so auch den Entwurf der Dehnungskörper zu ermöglichen.

Tabelle 6.7.: Simulatorischer Vergleich zwischen Referenzaktor und optimierten Aktoren

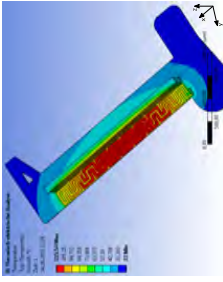
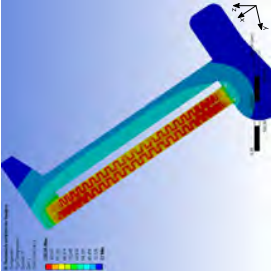
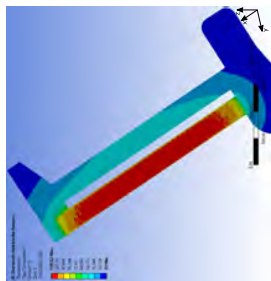
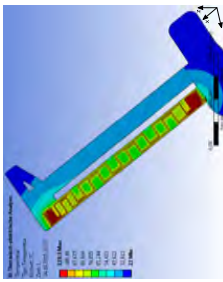
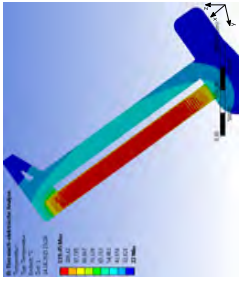
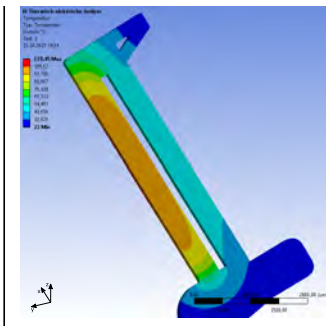
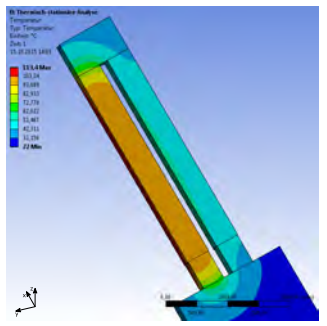
Eigenschaften	Einheit	Referenz	Typ A	Typ B	Typ C	Typ D
						
P_{el}	mW	133,7	146,5	163,2	119,2	154,5
T_{Max}	°C	115,5	118,6	118,52	119,3	119,5
T_{MW}	°C	107,8	104,9	111,9	84,3	113,4
$\xi_{Leerlauf}$	μm	48,4	52,8	56,1	39,7	56,9
$\xi_{Out-of-plane}$	μm	-16,5	3,2	5,0	1,4	3,0
F_{Block}	mN	39,5	42,0	42,0	31,5	43,7

Tabelle 6.8.: Vergleich der Simulationsansätze für den Aktorentwurf zwischen elektrothermisch-mechanisch gekoppelter Simulation mit optimiertem Heizer und vereinfachtem Modell mit konstanter Temperatur an der Unterseite des geheizten Balkens

Eigenschaften	Einheit	Typ D	vereinfacht ohne Heizer
			
T_{Max}	°C	120	113,4
ξ_{Leerlauf}	µm	56,9	59,4
F_{Block}	mN	43,7	43,7

Die Kenndaten des optimierten Aktors in Tabelle 6.7 zeigen eine sehr gute Temperaturhomogenität: Bei einer Maximaltemperatur von 120 °C stellt sich eine mittlere Temperatur von 113,4 °C ein. Tabelle 6.8 zeigt die Simulationsergebnisse des Aktors „Typ D“ im Vergleich zu einer vereinfachten Simulation mit konstanter Heizertemperatur von 113,4 °C. Es stellt sich mit 59,4 µm eine um 4 % zu hohe Leerlaufauslenkung ein, die Blockierkräfte decken sich mit 43,7 mN genau. Die Überschätzung der Leerlaufauslenkung ist auf die Vernachlässigung der Heizersteifigkeit zurückzuführen. Der Fehler ist mit 4 % aber klein.

Der Einsatz des vereinfachten Modells zum Aktorentwurf ist damit möglich, so lange im Anschluss die Heizerauslegung nach der oben vorgestellten Methode durchgeführt wird. Die vereinfachte Simulation bietet weitere Vorteile: Zum einen reduziert sich durch den Wegfall der elektrothermischen Kopplung die Simulationszeit auf wenige Minuten. Zum anderen lässt sich das thermische Leitfähigkeitsprofil zur Heizerauslegung direkt aus der vereinfachten Simulation entnehmen. Damit bietet sie sowohl die Möglichkeit des mechanischen Aktorentwurfs, als auch die Grundlage der anschließenden Heizerauslegung.

7 Messtechnische Charakterisierung und Betriebsgrenzen der Mikroaktoren

Im Folgenden werden verschiedene Aktorvarianten aufgebaut und hinsichtlich ihrer statischen und dynamischen Eigenschaften, sowie des Langzeitverhaltens charakterisiert. Die Untersuchung beschränkt sich dabei auf Varianten von In-plane Aktoren mit gleichem Dehnungskörper und verschiedenen Heizerdesigns. Zur Charakterisierung kommt die in Kapitel 3.2 vorgestellte Messtechnik zur Erfassung von Strom, Spannung, Auslenkung und Oberflächentemperatur der Mikroaktoren zum Einsatz. Es sollen die in Kapitel 6.2 durchgeführte Heizeroptimierung, sowie die in Kapitel 4 diskutierten Grenzen von SU-8 im Aktoreinsatz beurteilt werden. Ziel ist die Validierung der in Kapitel 6 gezeigten Entwurfsmethode und das Ableiten von Betriebsgrenzen für die elektrothermischen Mikroaktoren.

7.1 Herstellungsprozess der Mikroaktoren

Mit Hilfe der in dieser Arbeit zur Verfügung stehenden Technologien der Oberflächenmikromechanik werden die Mikroaktoren aufgebaut. Darunter fallen die Prozesse der UV-Tiefenlithographie, nasschemisches Ätzen, Sputtern metallischer Dünnschichten und Galvanoformung von Nickel. Abbildung 7.1 zeigt schematisch den Herstellungsprozess.

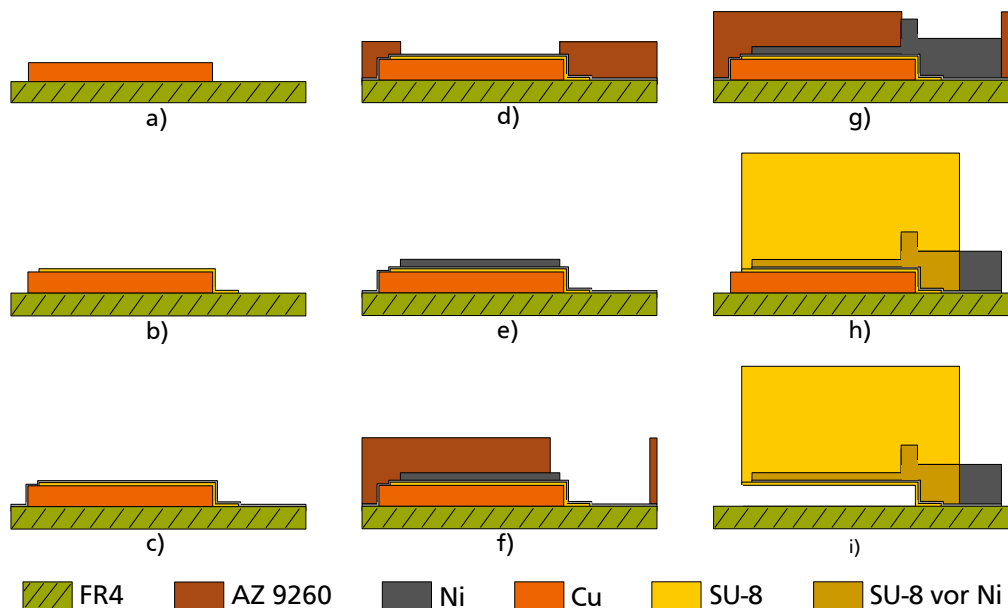


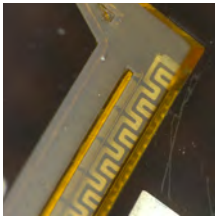
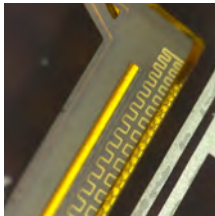
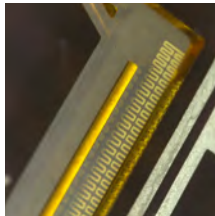
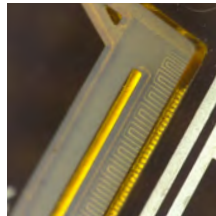
Abbildung 7.1.: Prozessschema der Mikroaktoren: a) Opferschicht: Nasschemisches Strukturieren von 15 µm Cu; b) Heizer I: UV-tiefenlithographische Strukturierung von 20 µm SU-8 2025 als Schutz für den Heizer; c) Heizer II: Flächiges Aufputtern von 20 nm Cr und 200 nm Cu als Galvanostartschicht; d) Heizer III: UV-lithographische Strukturierung von 10 µm AZ9260 als Galvanoform; e) Heizer IV: Galvanisches Abscheiden von 1,5 µm Ni; f) Heizerkontaktierung I: UV-lithographische Strukturierung von 30 µm AZ9260 als Galvanoform; g) Heizerkontaktierung II: Galvanisches Abscheiden von 20 µm Ni; h) Dehnungskörper: UV-tiefenlithographische Strukturierung von 300 µm SU-8 2025; i) Freistellen: Nasschemisches Entfernen der Opferschicht und Hardbake der Aktoren bei 180 °C

Die Mikroaktoren werden auf handelsüblichem Platinenmaterial, FR4 mit einer Kupferkaschierung von 15 µm Dicke, das als gemeinsames Substrat dient, aufgebaut. FR4 ist ein sehr kosteneffizientes Substratmaterial und bietet durch seine große Rauheit eine sehr gute Haftung für die Mikrostrukturen. Die Kupferkaschierung wird direkt als Opferschicht zum späteren Freistellen der Aktoren genutzt. Hierfür wird zunächst der mitgelieferte und meist ausgetrocknete Lack mit Aceton und DI-Wasser entfernt und 10 µm des hochauflösenden UV-Positivresists AZ9260® aufgeschleudert. Durch Photolithographie und Nassätzen mit APDS (Amoniumperoxodisulfat $\text{NH}_4\text{S}_2\text{O}_8 + \text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O}_2$) wird die Kupferschicht strukturiert. Dann wird zum Schutz des Heizers eine mit 20 µm sehr dünne Schicht SU-8 2025 aufgebracht und mit Hilfe der UV-Tiefenlithographie strukturiert. Sie dient dazu, den Heizer im späteren Aktor vollständig mit SU-8 zu umschließen, so dass sich der Heizer im Betrieb nicht vom Polymer lösen kann. Anschließend wird das Substrat flächig mit 20 nm Chrom und 200 nm Kupfer als Galvanostartschicht besputtert. Über eine lithographisch strukturierte Form aus AZ9260® mit 10 µm Höhe wird der Heizer in einer Dicke von 1,5 µm galvanisch abgeformt. Dieser Schritt wird mit einer Lackform von 30 µm Höhe für die Abformung der Leiterbahnen und Kontaktpads wiederholt. Dabei muss die Dicke der Nickelschicht mit 20 µm über der Höhe der Opferschicht liegen, um die Kontaktierung des Heizers herunter auf die Substratebene sicherzustellen. Danach wird SU-8 2025 in einer Zieldicke von 300 µm aufgegossen und mittels Tiefenlithographie strukturiert. Nassätzen der Galvanostartschichten und der Opferschicht schließen die mikrotechnische Fertigung ab. Ein Hardbake über 48 h bis zu einer Temperatur von 180 °C sorgt für die endgültige Quervernetzung des Polymers und stellt die in Kapitel 4 beschriebenen mechanischen und thermischen Eigenschaften her. Der Backschritt erfolgt in einem Konvektionsofen, um Temperaturgradienten in der Schicht zu vermeiden. Dabei werden die Wafer auf dem Kopf liegend gebacken, damit die bereits freigestellten Aktoren nicht am Substrat anhaften.

7.2 Charakterisierte Aktorvarianten

Im Folgenden werden die im Rahmen dieser Arbeit aufgebauten und charakterisierten Aktorvarianten vorgestellt. Tabelle 7.1 zeigt die vier Varianten: Die Bezugsgeometrie „Referenz“ und die vier im vorigen Kapitel erläuterten, nach unterschiedlichen Vorschriften optimierten Designs „Typ A - D“. Die simulierten Kennwerte dieser Aktoren sind im vorigen Kapitel in Tabelle 6.7 aufgeführt.

Tabelle 7.1.: Im Rahmen dieser Arbeit charakterisierte Aktorvarianten

Referenz	Typ A	Typ B	Typ D
			

Alle Aktorvarianten werden innerhalb eines Wafers, sowie auf mehreren Wafers charakterisiert, um neben der Streuung der Kennwerte auch die Reproduzierbarkeit des Herstellungsprozesses zu untersuchen.

7.3 Charakterisierung des statischen Verhaltens

Zur Charakterisierung des statischen Verhaltens werden die Aktoren auf dem Motion-Analyzer für 60 Sekunden mit einem konstanten Strom beaufschlagt, bevor die am Aktor abfallende Spannung

und die Leerlaufauslenkung bestimmt werden. Damit ist der Aufheizvorgang sicher abgeschlossen und der Aktor in einem definierten Zustand. Nach Aufnahme der Messwerte folgt eine Pause der gleichen Länge, um ein vollständiges Abkühlen zu gewährleisten, und eine erneute Aufnahme der Aktorposition. Mit Hilfe der Thermokamera wird die maximale Endtemperatur der Aktoroberfläche bestimmt. Jedem nachfolgend abgebildeten Graphen liegen die gemittelten Kennlinien von fünf Aktoren zu Grunde.

Es zeigt sich, dass die Schichtdicken der gefertigten Aktoren innerhalb eines Wafers und vor allem zwischen zwei Wafern im Bereich von 300...450 μm schwanken. Die gezeigten Kennlinien müssen daher rechnerisch auf die Solldicke von 300 μm korrigiert werden, um vergleichbar zu sein. Hierfür wird mit Hilfe des FEM-Modells die Änderung der Kennliniensteigung $\xi(P_{el})$ in Abhängigkeit der Schichtdicke bestimmt.

7.3.1 Grundsätzliches Aktorverhalten

Abbildung 7.2a) zeigt die gemittelten statischen Kennlinien der Aktorvariante „Typ A“ von Wafer 29. In Abbildung 7.2b) sind die Oberflächentemperaturen dargestellt. Grundsätzlich entsprechen sowohl das Temperaturverhalten, als auch die Aktorbewegung der Erwartung und sind in guter Näherung linear zur Steuerleistung. Bei 150 mW erreicht die Aktoroberseite eine Maximaltemperatur von 100 $^{\circ}\text{C}$, was den simulierten Aktorkennwerten entspricht (siehe Tabelle 7.1) und den Schluss zulässt, dass die Heizertemperatur bei 120 $^{\circ}\text{C}$ liegt. Dies entspricht der in Kapitel 4.6 empfohlenen Maximaltemperatur für SU-8. Der an diesem Punkt von der Aktorspitze zurückgelegte Weg liegt mit ca. 60 μm etwas über dem erwarteten Wert von 52,5 μm .

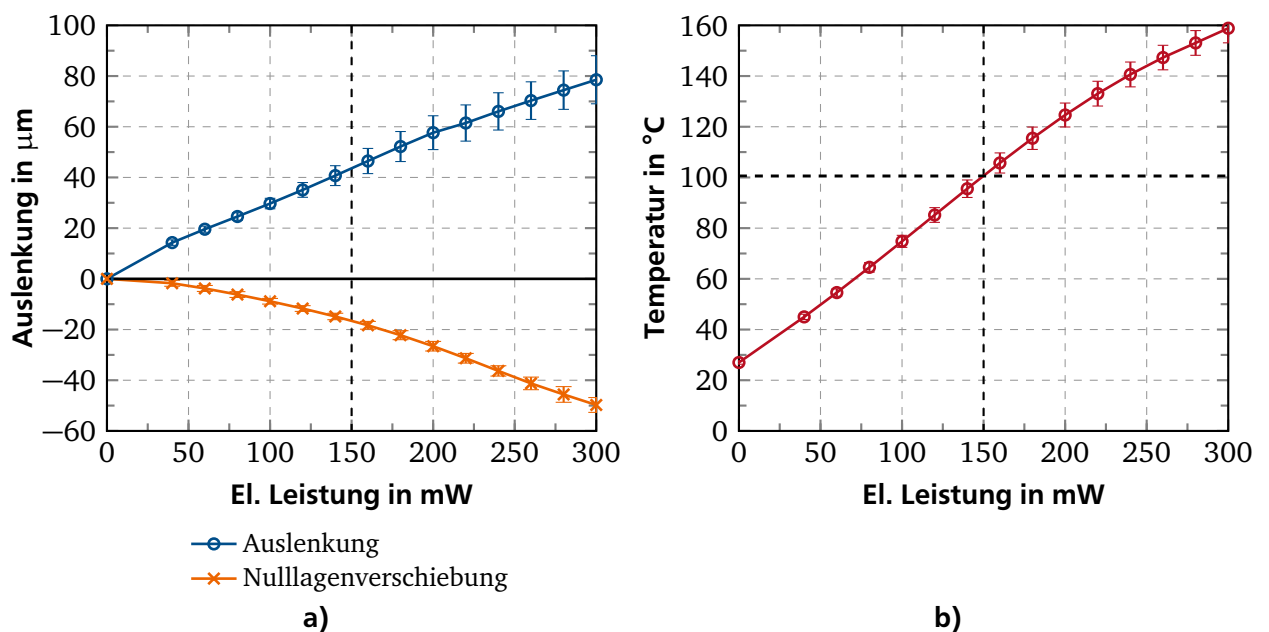


Abbildung 7.2.: Statisches Aktorverhalten, gemittelt aus fünf Aktoren von „Typ A“ von Wafer 29:
a) Auslenkung und Nulllagenverschiebung in Abhängigkeit der Steuerleistung;
b) Maximale Oberflächentemperatur in Abhängigkeit der Steuerleistung

Es zeigt sich deutlich, dass schon ab sehr geringen elektrischen Leistungen eine Schädigung der Aktoren eintritt, die sich in einer Verschiebung der Nulllage entgegen der Aktuierungsrichtung zeigt, und damit die aus der Fertigungslage heraus nutzbare Auslenkung des Aktors reduziert. Aufgrund dieses Aktorverhaltens wird bei der Beschreibung der Aktoren im Folgenden unterschieden in:

- Aktorhub: Der durch Aufheizen zurückgelegte Weg ($\hat{=}$ Ergebnis der FEM-Simulation)
- Auslenkung: Aus der Fertigungslage heraus in Betriebsrichtung nutzbarer Weg
- Nulllage: Entgegen der Betriebsrichtung vorhandene plastische Verformung

Die Nulllagenverschiebung nimmt mit der Steuerleistung zu und liegt im Bereich von 100...200 mW bei 20...30 % des Aktorhubs. Erneutes Aufnehmen der Kennlinien zeigt, dass die Nulllagenverschiebung nicht reversibel ist, mit einer Standardabweichung von ca. 3,5 % aber reproduzierbar. Die Auslenkung schwankt zwischen verschiedenen Aktoren mit einer Standardabweichung von bis zu 6,5 μm , was ca. 10 % des gemittelten Hubs entspricht.

Die Streuung der gemessenen Aktorkennwerte ist gerade durch die große Nulllagenverschiebung sehr deutlich. Präzise Vergleiche zwischen den Aktorvarianten sind daher kaum möglich, dennoch lassen sich Trends zwischen den Varianten und Fertigungschargen aufzeigen.

7.3.2 Vergleich der Aktordesigns

Im Folgenden wird das statische Verhalten der in Tabelle 7.1 vorgestellten Aktordesigns verglichen. Dazu werden auf sechs verschiedenen Wafern je fünf Aktoren pro Variante charakterisiert, gemittelt und verglichen. Den im Folgenden dargestellten Kennlinien liegen also 20 Einzelkennlinien zu Grunde. Aufgrund der im vorigen Kapitel gezeigten großen Streuung können hier nur Trends aufgezeigt werden. Abbildung 7.3 zeigt die Auslenkung, die Nulllagenverschiebung und das Temperaturverhalten der Aktorvarianten im Vergleich. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind hier weitgehend keine Standardabweichungen eingezeichnet.

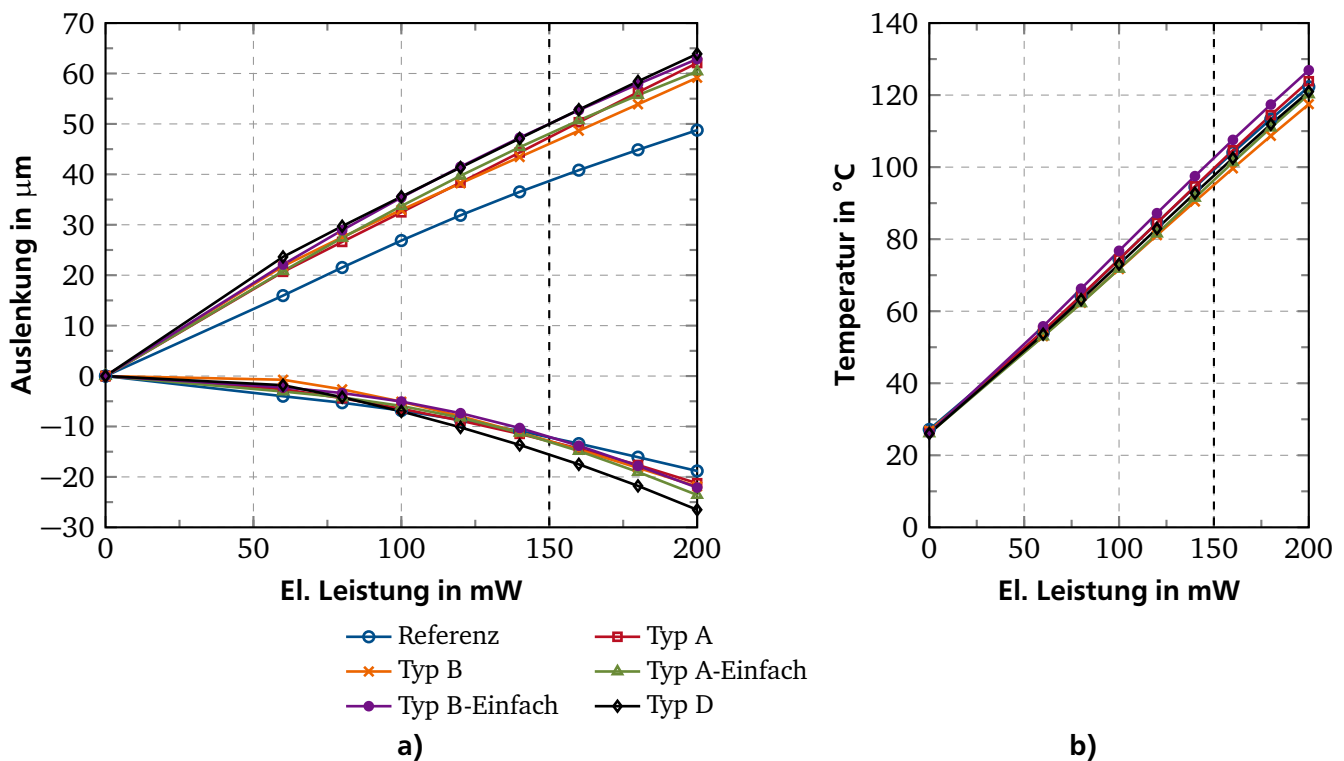


Abbildung 7.3.: Vergleich der Aktordesigns anhand des statischen Verhaltens mit markiertem Arbeitspunkt bei 150 mW: a) Auslenkung und Nulllage in Abhängigkeit der elektrischen Leistung; b) Maximale Oberflächentemperatur in Abhängigkeit der Leistung

Alle im Laufe dieser Arbeit entstandenen Varianten zeigen eine erhöhte Leistungsfähigkeit im Vergleich zur Ausgangsgeometrie „Referenz“. Die Nulllagenverschiebung tritt für alle Aktoren näherungsweise gleich auf. Die optimierten Aktoren erreichen bei 150 mW Auslenkungen von 46,0...50,0 μm , das Referenzdesign erreicht im Mittel 38,7 μm . Damit ist eine Leistungssteigerung von 20...30 % nachgewiesen, was den laut Simulation zu erwartenden Wert von 15 % noch übertrifft. Eine Unterscheidung der optimierten Varianten ist aufgrund der Streuung und Nulllagenverschiebung nicht sinnvoll. Allerdings weisen die gemittelten Kennlinien von Aktoren mit Einfachmäander eine um 3 μm höhere Auslenkung auf, als Aktoren mit Doppelmäander. Dies erklärt sich durch die geringere Eigensteifigkeit der Einfachmäander (siehe auch Kapitel 6.2.2). Die Variante „Typ D“ weist trotz leicht erhöhter Nulllagenverschiebung eine größere Auslenkung auf und zeigt damit unter den optimierten Aktoren die größte Verbesserung. Die in dieser Arbeit vorgestellte Optimierungsmethode kann daher als validiert gelten.

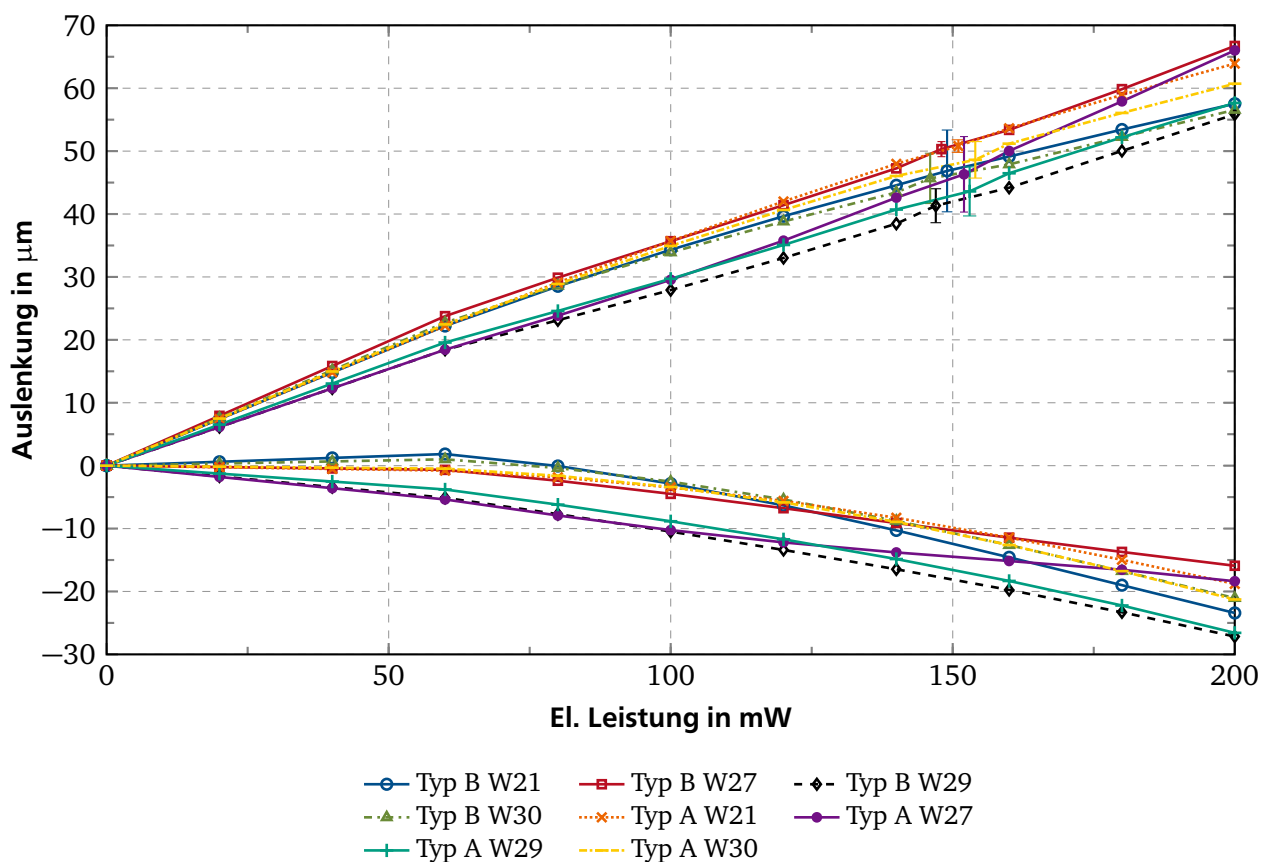


Abbildung 7.4.: Vergleich der Varianten „Typ A“ und „Typ B“ auf vier verschiedenen Wafern mit exemplarischen Standardabweichungen bei 150 mW

Zur Prüfung der Reproduzierbarkeit des Aktorerhaltens zwischen unterschiedlichen Fertigungschargen, werden die Varianten „Typ A“ und „Typ B“ auf vier verschiedenen Wafern charakterisiert und verglichen. Es resultieren 40 Einzelkennlinien, aus denen die Reproduzierbarkeit des Aktorverhaltens und die für den Aktorentwurf zu erwartende Streuung abgeleitet werden kann. Abbildung 7.4 zeigt das Kennlinienfeld für alle Varianten und Wafer. Auch in dieser Betrachtung ist kein Trend zwischen den Varianten zu erkennen. Die einzelnen Kennlinien weisen Standardabweichungen von 1...6,5 μm auf, die Standardabweichung aller Kennlinien beträgt mit 3,3 μm ca. 7 %. Die Aktoren der Wafer 27 und 29 zeigen eine größere Nulllagenverschiebung als die Aktoren der Wafer 21 und 30 auf und erreichen daher auch geringere Auslenkungen. Die Gründe für die Schwankungen des

Aktorverhaltens werden später näher erläutert, hier sollen aber Designrichtlinien zum Aktorentwurf abgeleitet werden für den auch systematische Abweichungen des Aktorverhaltens, z.B. durch Toleranzen in der Prozessierung berücksichtigt werden müssen.

Aus der Betrachtung des statischen Aktorverhaltens verschiedener Aktorvarianten auf verschiedenen Wafern und unterschiedlichen Fertigungschargen resultiert für diese Arbeit:

- Bei einer Steuerleistung von 150 mW erreichen die Aktoren eine Maximaltemperatur von 120 °C, dies wird als Arbeitspunkt gewählt.
- Eine Nulllagenverschiebung entgegen der Betriebsrichtung von 25 % des Aktorhubs tritt auf und ist beim Entwurf vorzusehen.
- Im Arbeitspunkt werden Auslenkungen von maximal 50 µm erreicht.
- Eine Streuung der Auslenkung von ca. 7 % ist beim Aktorentwurf zu berücksichtigen.
- Das in dieser Arbeit optimierte Heizerdesign führt zu einer Steigerung der Leerlaufauslenkung von 20...30 % im Vergleich zur Referenz.

7.4 Charakterisierung des dynamischen Verhaltens

Im Folgenden wird das dynamische Verhalten der Aktoren anhand der mechanischen und thermischen Sprungantwort untersucht. Die Aktoren werden mit Stromsprüngen beaufschlagt und die aufgenommene elektrische Leistung im Nachgang berechnet. Neben der Diskussion des grundsätzlichen Verhaltens werden die Varianten „Typ A“, „Typ B“ und „Typ D“ verglichen. Entsprechend des in Kapitel 2.1.2 erläuterten grundsätzlichen Aktorverhaltens, wird für die Sprungantworten PT1-Verhalten erwartet und eine Zeitkonstante, die „Ansprechzeit“ $t_A = 2 \cdot \tau$ der Aktoren bestimmt.

Abbildung 7.5 zeigt die Stromsprungantworten von Leerlaufauslenkung und Oberflächentemperatur eines Aktors vom Typ „Typ A“ für ansteigende elektrische Leistungen bis hin zum Arbeitspunkt bei 150 mW. Dabei werden die um die Nulllagenverschiebung korrigierten Werte angegeben. Tabelle 7.2 gibt eine Übersicht der Endwerte von Auslenkung und Temperatur, der Nennwerte bei $2 \cdot \tau$ (= 86,5 %), sowie der daraus numerisch bestimmten Ansprechzeiten.

Tabelle 7.2.: Zeitverhalten der mechanischen und thermischen Sprungantwort für steigende Steuerleistungen

P_{El} in mW	$2 \cdot \tau_{mech}$ in s	$\xi_{2 \cdot \tau_{mech}}$ in µm	$\xi_{Leerlauf}$ in µm	$T_{Oberfläche}$ in °C
54,2	1,20	17,3	20,0	50,4
78,3	1,35	25,1	29,0	62,6
102,0	1,50	33,0	38,2	75,1
121,8	1,80	41,0	47,4	90,2
145,9	1,90	49,6	57,3	104,1

Die Endwerte beider Sprungantworten sind in guter Näherung proportional zur eingekoppelten Leistung. Das Zeitverhalten erweist sich als abhängig von der Steuerleistung: Die mechanische Ansprechzeit steigt von 1,2 s bei ca. 50 mW auf über 1,9 s im Arbeitspunkt. Der Grund liegt in der stromgetriebenen Ansteuerung der Aktoren, bei der die in den Aktor eingekoppelte Leistung mit dem Aufheizen des Aktors zunimmt: $P_{El} = I^2 \cdot R_{20}(1 + \alpha_{Ni} \Delta T(t, P_{El}))$.

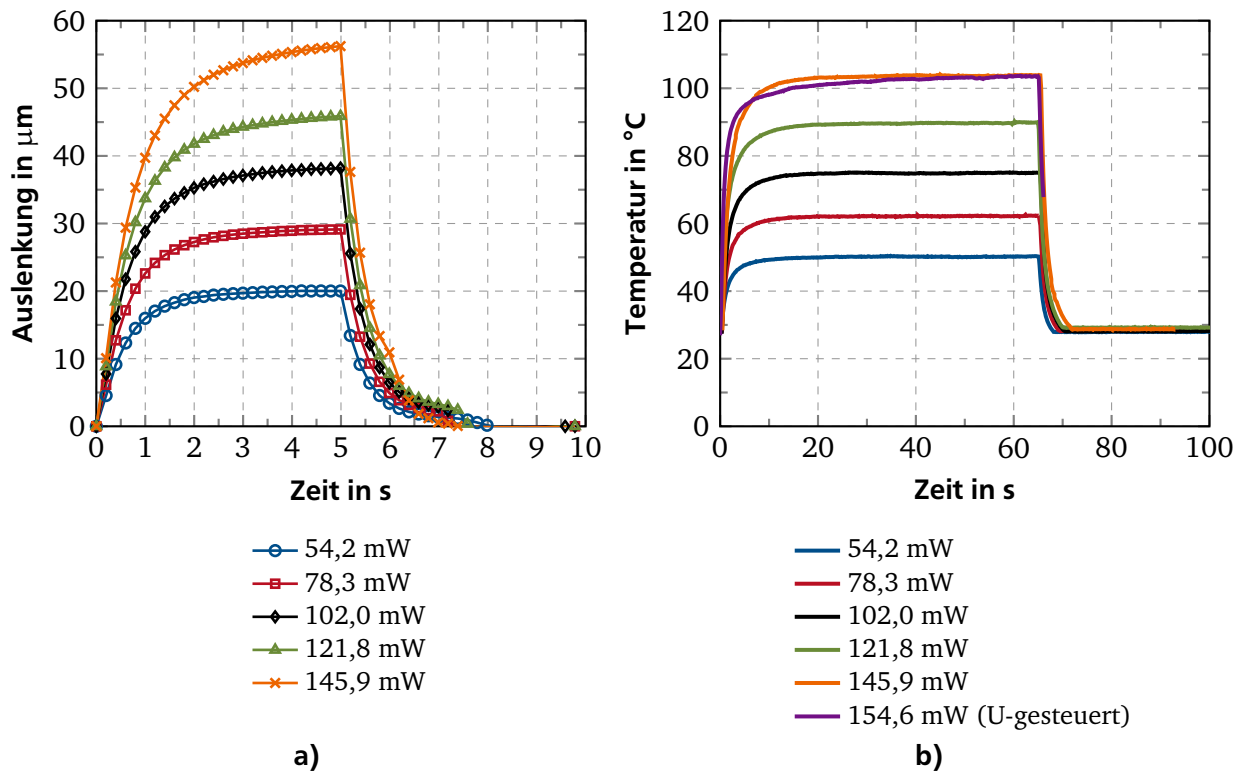


Abbildung 7.5.: Stromsprungantworten eines Aktors „Typ A“ für ansteigende Steuerleistungen: a) Mechanisches Zeitverhalten; b) Thermisches Zeitverhalten - für 145 mW ist zum Vergleich eine Spannungssprungantwort dargestellt

Zum Vergleich wird die Spannungssprungantwort der Aktortemperatur für eine Steuerleistung von 144,5 mW bestimmt und in Abbildung 7.5b) dargestellt. Wie erwartet sind die Endwerte der Temperaturen gleich, der Aktor heizt sich jedoch schneller auf. Auch hier liegt der Grund in dem langsamen Ansteigen des Heizerwiderstands, der die Leistungsaufnahme des Aktors mit der Zeit hemmt. Die nachfolgenden Gleichungen verdeutlichen den Unterschied der Steuerleistungen zum Zeitpunkt des Einschaltens:

$$P_{\infty} = \frac{U_{\text{Steuer}}^2}{R_{\infty}} = I_{\text{Steuer}}^2 \cdot R_{\infty} \quad (7.1)$$

mit

$$R_{t0} < R_{\infty} \quad (7.2)$$

$$P_{U-t0} = \frac{U_{\text{Steuer}}^2}{R_{t0}} > P_{I-t0} = I_{\text{Steuer}}^2 \cdot R_{t0} \quad (7.3)$$

Die Spannungsansteuerung der Aktoren erweist sich daher zum Erreichen der Nennauslenkung als günstiger. Das Temperaturverhalten des Aktors lässt für den Arbeitspunkt bei 150 mW auf eine Ansprechzeit von 1,4 s schließen.

Weiterhin folgt, dass die Annahme des PT1-Verhaltens für das Ansprechen der Aktoren nur im Fall der leistungsgeregelten Ansteuerung gilt. Die Angabe einer Zeitkonstanten τ ist daher mathematisch nicht korrekt, wird hier aber der Verständlichkeit halber beibehalten.

Vergleicht man das mechanische Ansprechverhalten verschiedener Aktorvarianten, so lässt sich kein Unterschied erkennen. Da die Aktoren immer von ihrer Unterseite aus geheizt werden und das vertikale Durchheizen des Polymers die Dynamik bestimmt, entspricht dieses Ergebnis der Erwartung. Abbildung 7.6a) zeigt die Stromsprungantworten der Aktoren von „Typ A“, „Typ B“ und „Typ D“ für ca. 150 mW. Deutlichen Einfluss auf die Ansprechzeit hat jedoch die Aktordicke, wie der Vergleich von Aktoren des Typs „Typ A“ mit unterschiedlichen Schichtdicken zeigt. Dies ist in Abbildung 7.6b) dargestellt. Dabei scheint die Ansprechzeit näherungsweise linear mit der Schichtdicke anzusteigen.

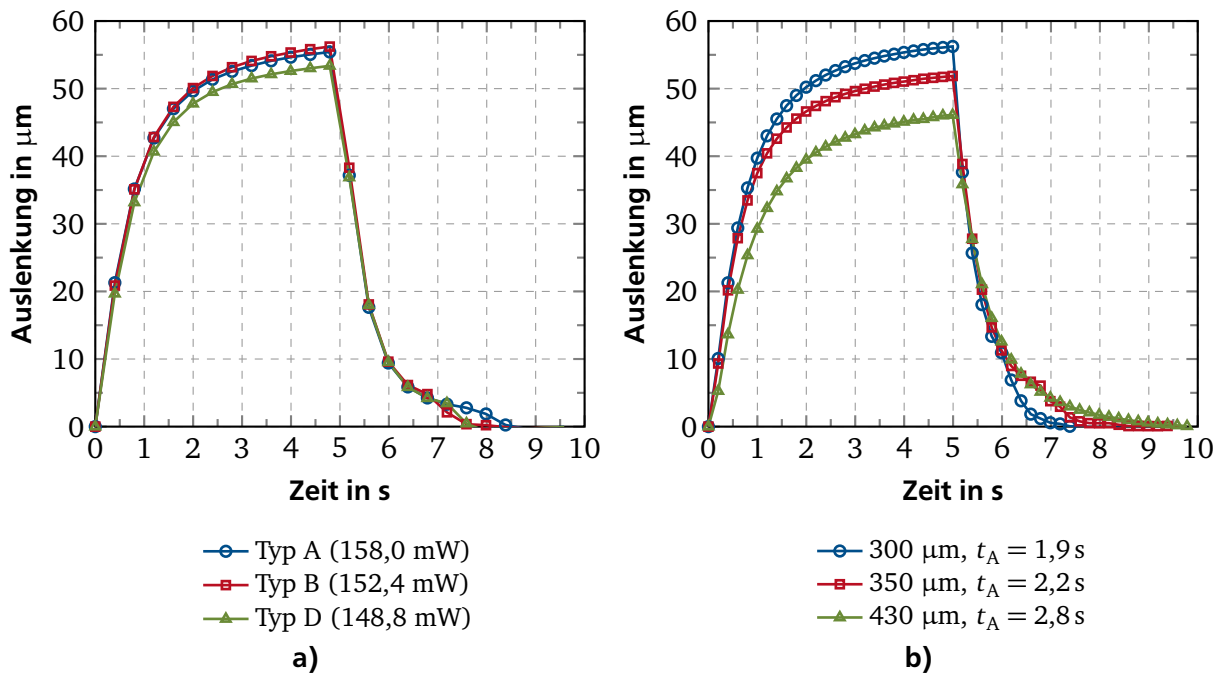


Abbildung 7.6.: Stromsprungantworten: a) der Aktoren „Typ A“, „Typ B“ und „Typ D“ für ca. 150 mW im Vergleich; b) des Aktordesigns „Typ A“ für die Schichtdicken 300 μm , 350 μm und 430 μm

Aus der Betrachtung des dynamischen Aktorverhaltens resultiert:

- Die Ansprechzeit ist abhängig von der Steuerleistung und liegt im Arbeitspunkt von 150 mW bei 1,9 s.
- Die thermische Ansprechzeit ist im Arbeitspunkt doppelt so hoch, wie die mechanische. Die Charakterisierung des thermischen Verhaltens reicht zur Beschreibung der Aktoren nicht aus.
- Die Ansprechzeit ist unabhängig vom lateralen Design des Heizers und des Aktors.
- Die Ansprechzeit steigt mit der Schichtdicke, in der Aktorherstellung ist die Genauigkeit der Schichtdicke sehr wichtig.

Bei analytischen Betrachtungen muss die quadratische Abhängigkeit zwischen Steuerleistung und treibender elektrischer Größe (Strom oder Spannung) berücksichtigt werden. Daraus folgt, dass die Zeitkonstante zum einen vom Betrag der treibenden Größe, aber auch vom Grundwiderstand des Heizers abhängt. Es ergibt sich ein Zielkonflikt bei der Aktorauslegung zwischen hohem Heizerwiderstand, um unabhängig von den Zuleitungswiderständen zu sein, und niedrigem Widerstand für bessere Dynamik. Diese und weitere Betrachtungen werden in den Arbeiten von Nakic und Dörr durchgeführt.

7.5 Charakterisierung des Langzeitverhaltens

Nach der Betrachtung der kurzzeitigen statischen und dynamischen Eigenschaften, wird im Folgenden das Verhalten im Dauerbetrieb und die Lebensdauer der Aktoren untersucht. Dafür kommen Aktoren vom Typ „A“ zum Einsatz, die mit Stromsprüngen für verschiedene Steuerleistungen beaufschlagt werden. Die Betriebsfrequenz ist analog zur dynamischen Betrachtung 0,1 Hz. Ziel der Untersuchungen ist das Ableiten von Betriebsgrenzen anhand des Einlaufens, einer Aktordrift oder der Maximalzahl an Aktorzyklen.

7.5.1 Verhalten im Dauerbetrieb

Zunächst werden Aktoren mit zunehmenden Leistungen zwischen 150...250 mW betrieben. Jede Leistungsstufe wird für 1000 Zyklen gehalten, gefolgt von einer 10-minütigen Abkühlpause. Alle 20 Minuten wird ein Messwert für Auslenkung und Nulllage aufgenommen. Die Ergebnisse sind aus den Kennlinien von drei Aktoren zusammengefügt und in Abbildung 7.7 dargestellt.

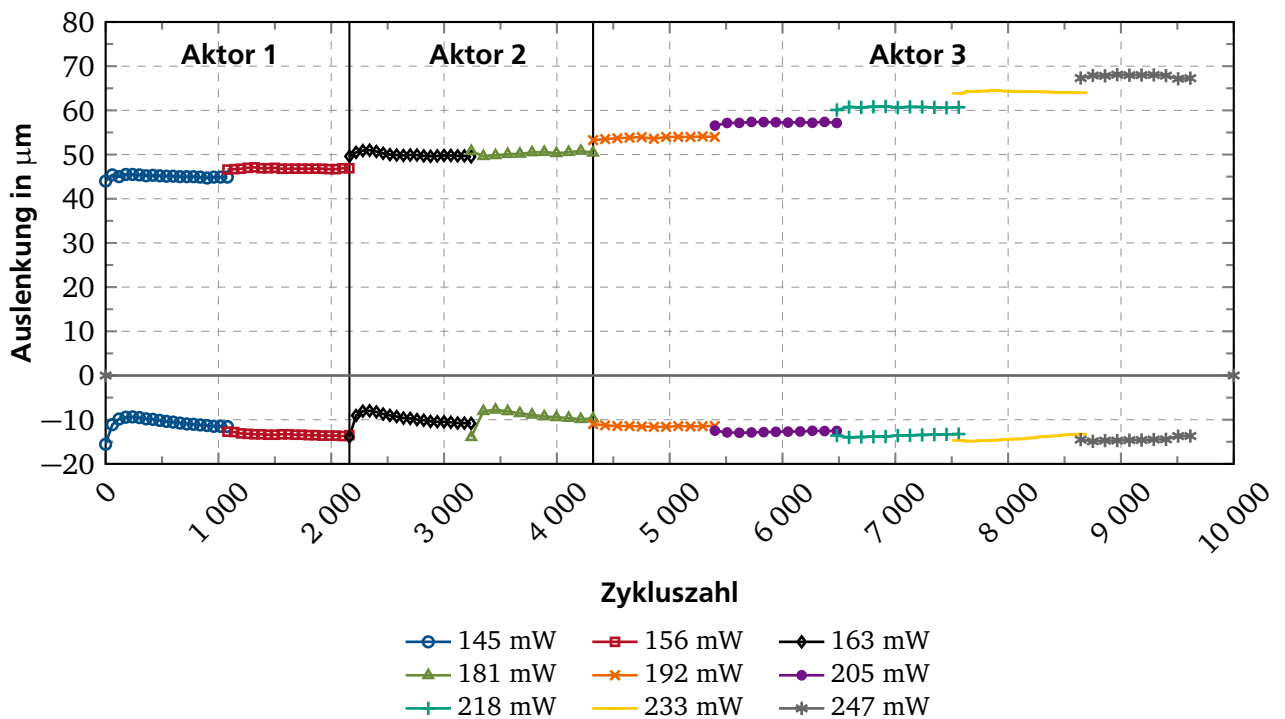


Abbildung 7.7.: Auslenkung und Nulllagenverschiebung der Aktorvariante „Typ A“ über 1000 Zyklen ($f = 0,1$ Hz) pro Stufe für zunehmende Steuerleistungen (Aus Charakterisierung von drei Aktoren zusammengesetzter Graph)

Bis zu einer Grenze von 250 mW werden 1000 Zyklen je Leistungsstufe erreicht. Dies entspricht einer maximalen Betriebstemperatur von 160 °C. Die Auslenkungen streuen mit ca. 0,5 µm um die Mittelwerte der jeweiligen Stufe, was innerhalb der Messunsicherheit des verwendeten Messsystems liegt. Die erreichten Auslenkungen stimmen sehr gut mit den statischen Kennlinien aus Abbildung 7.2 überein. Zudem ist auch bei hoher Steuerleistung keine Drift der Auslenkungen erkennbar. Die Nulllagenverschiebung ist für jeden Aktor in guter Näherung proportional zur Steuerleistung, unterscheidet sich jedoch im Betrag.

In einem weiteren Versuch wird ein Aktor in Zyklen von 10 h Dauerbetrieb bei 150 mW, gefolgt von 10 h Pause, betrieben und das Aktorverhalten über die jeweils ersten 2,5 h nach (Wieder-)

Einschalten aufgetragen. Abbildung 7.8 zeigt die Auslenkung und die Nulllagenverschiebung in Abhängigkeit der Zeit. Die Kurven sind zum Vergleich übereinander gelegt.

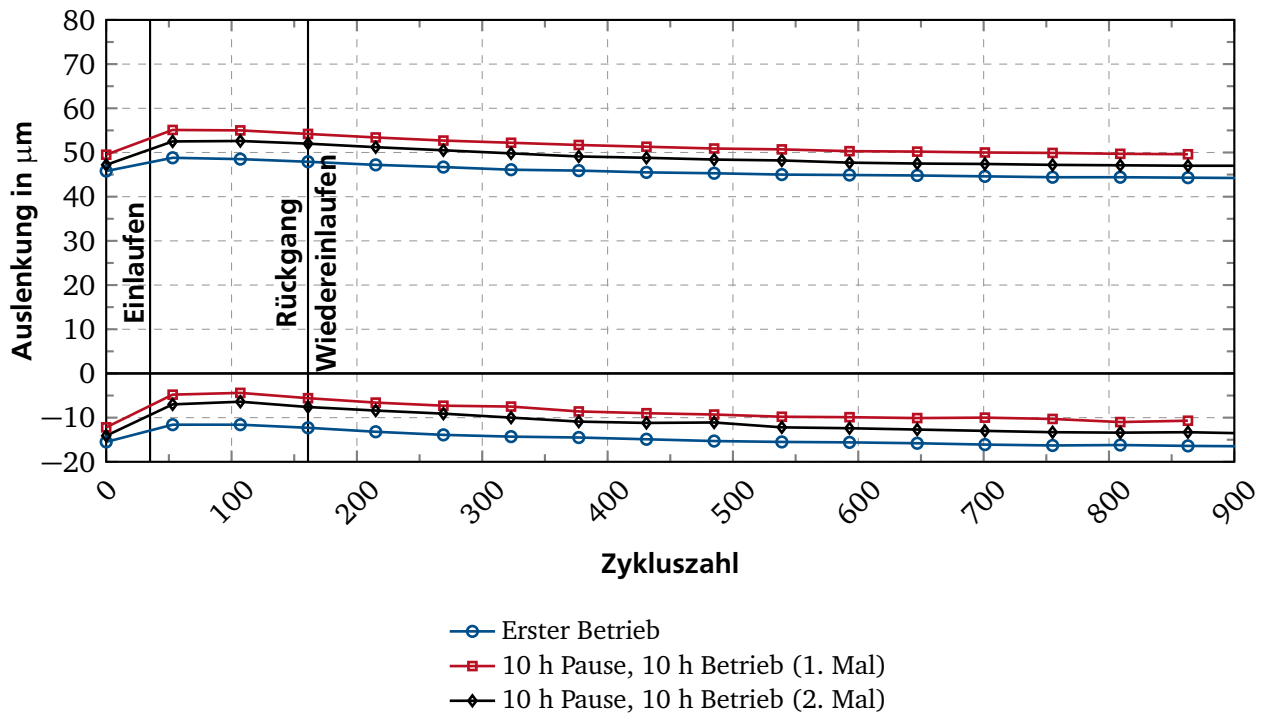


Abbildung 7.8.: Verlauf von Auslenkung und Nulllagenverschiebung für 900 Zyklen des selben Aktors bei 155 mW im ersten Betrieb und nach Intervallen 10 h Betrieb, gefolgt von 10 h Pause; Es zeigen sich die drei Phasen „Einlaufen“, „Rückgang“ und „Wiedereinlaufen“

Der Aktor zeigt bei der ersten Ansteuerung und nach jeder Pause das gleiche qualitative Verhalten, das sich in drei Phasen gliedert:

- Einlaufen: In den ersten Minuten stellt sich die größte Nulllagenverschiebung ein. Sie entspricht der Nulllagenverschiebung bei der statischen Charakterisierung.
- Rückgang: Innerhalb der folgenden 30 min geht diese Nulllagenverschiebung auf unter 50 % ihres Anfangswerts zurück.
- Wiedereinlaufen: Nach 2,5 Betriebsstunden ist fast der volle Anfangswert der Nulllage wieder erreicht.

Dabei zeigen die Kurven einen zufälligen Versatz von bis zu 6 µm, der sich keiner Betriebsdauer oder Schädigung zuschreiben lässt. Dieses Verhalten zeigt sich auch in der Auslenkung des Aktors. Der durch thermische Dehnung generierte Aktorhub ist demnach über die Zeit gleich, es tritt eine plastische Verformung des gesamten Aktors auf. Die größte Verformung stellt sich dabei in den ersten Sekunden des Betriebs ein und wird danach nicht wieder erreicht.

Aus den Untersuchungen lässt sich ableiten:

- Die Auslenkung und die Nulllagenverschiebung der Mikroaktoren entsprechen auch im Dauerbetrieb in guter Näherung den Werten der statischen Aktorkennlinie.

- Ein stabiler, driftfreier Dauerbetrieb über mehrere Stunden wird für Leistungen bis 218 mW ($\sim 150\text{ }^{\circ}\text{C}$) gezeigt.
- Die Aktoren weisen in den ersten 2,5 h des Betriebs und nach Pausen ein ausgeprägtes Einlaufverhalten auf.
- Die größte Nulllagenverschiebung entgegen der Betriebsrichtung stellt sich in den ersten Minuten des Betriebs ein.
- Die mit der statischen Kennlinie ermittelten Auslenkungen und Nulllagenverschiebungen sind auch nach vielen Betriebsstunden repräsentativ für das Aktorverhalten. Es sind keine aufwändigen Dauertests nötig. Die statische Kennlinie kann also zur Charakterisierung des Aktorverhaltens herangezogen werden.

7.5.2 Lebensdauer

Im Rahmen dieser Arbeit werden Aktoren bei konstanter Steuerleistung mit 0,1 Hz bis zum Ausfall betrieben und damit die Lebensdauer der Aktoren bestimmt. Aufgrund des hohen Zeitaufwands kann dies nur für wenige Aktoren geschehen. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind daher nur Richtwerte. Tabelle 7.3 zeigt die Steuerleistung, die resultierenden Maximaltemperaturen, Leerlaufauslenkungen, Zyklenzahlen und die mittels FEM bestimmten maximal auftretenden mechanischen Spannungen der untersuchten Aktoren.

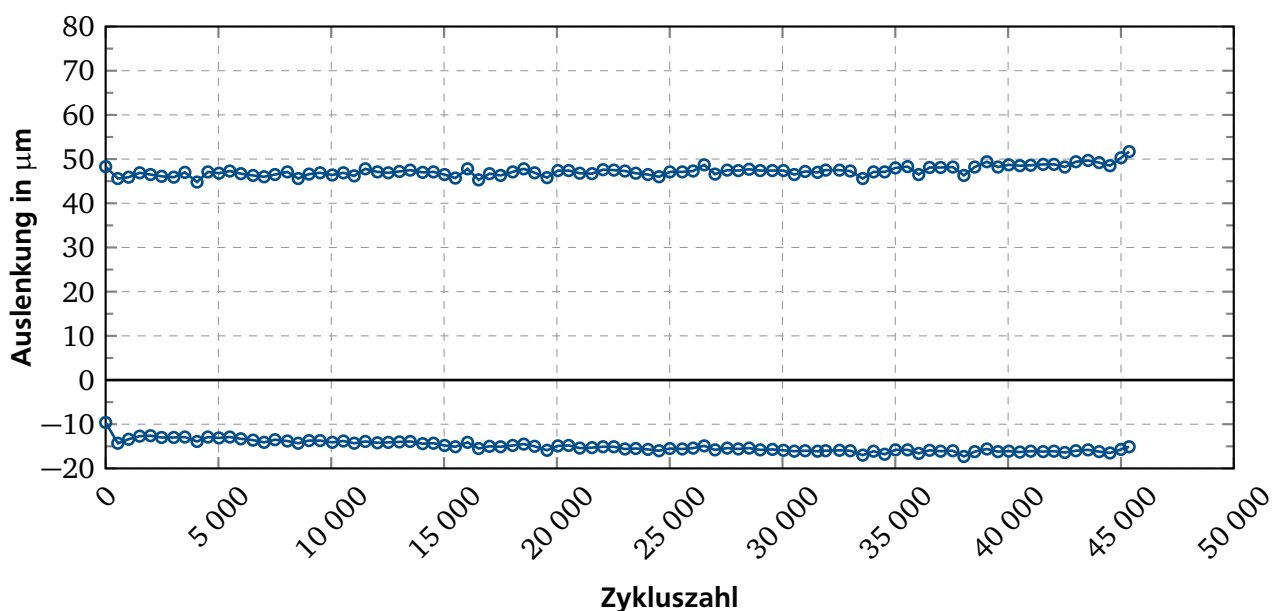


Abbildung 7.9.: Auslenkung und Nulllagenverschiebung eines Aktors bei 155 mW. Nach >45.350 Zyklen wird die Charakterisierung abgebrochen

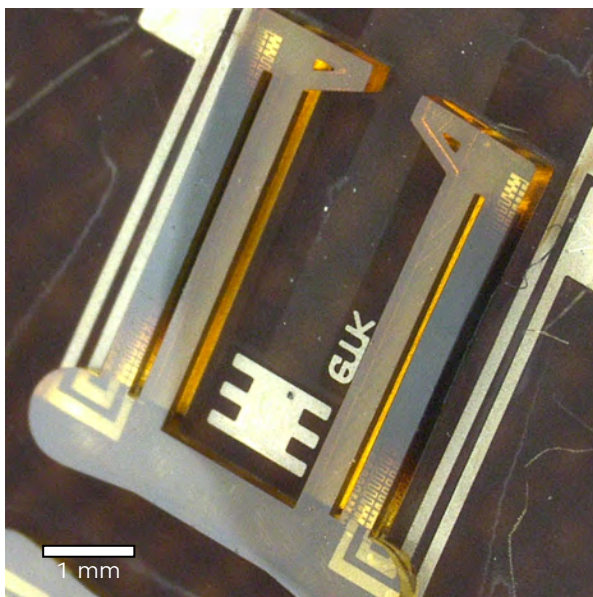
Es zeigt sich die erwartete Korrelation zwischen Steuerleistung und Lebensdauer: Mit dem Überschreiten einer maximalen Temperatur von $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ reduziert sich die Lebensdauer der Aktoren deutlich. Dennoch ist der unidirektionale Einsatz der Mikroaktoren auch bei hohen Leistungen driftfrei möglich, wenn die Anforderung an die Lebensdauer entsprechend reduziert wird. Abbildung 7.9 zeigt abschließend das Langzeitverhalten des Aktors bei 155 mW, dessen Untersuchung nach über fünf Tagen mit >45.350 Zyklen abgebrochen wird.

Tabelle 7.3.: Maximaltemperatur, Leerlaufauslenkung und Lebensdauer der Aktoren in Abhängigkeit der Steuerleistung

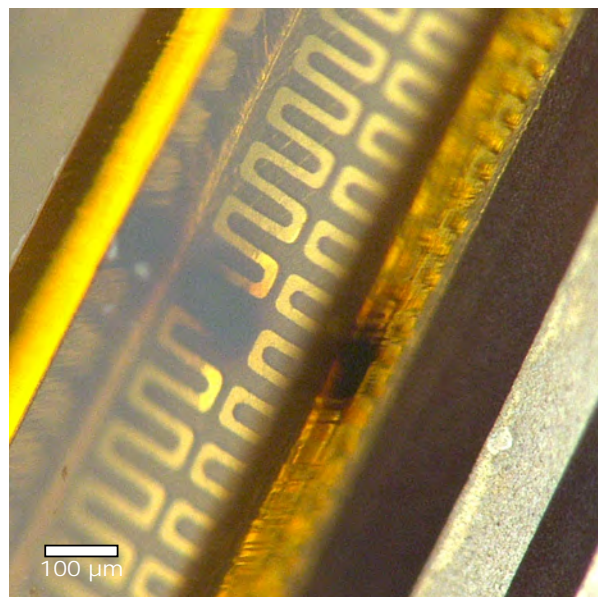
P_{El} in mW	T_{Max} in °C	ξ_{Leerlauf} in μm	Aktorzyklen	Dauer in h	σ_{Mech} in MPa	zerstört
315	185	85,7	900	2,5	63,1	Ja
280	170	69,7	1.800	5	54,6	Ja
244	155	61,2	3.900	10,8	46,3	Ja
230	150	59,9	9.600	26,7	44,2	Ja
190	130	54,0	16.200	45	35,8	Ja
155	120	46,9	>45.350	126	31,6	Nein

7.6 Aktorschädigung und -ausfall

Im Betrieb der Mikroaktoren kommt es aus zwei Gründen zum Ausfall: Wird der Aktor thermisch überlastet, denaturiert das Polymer und verkohlt auf dem vollständigen beheizten Bereich. Dies tritt bei den hier untersuchten Mikroaktoren ab einer Steuerleistung von ca. 330 mW auf. Im Dauerbetrieb kommt es durch die zyklische mechanische Belastung der Materialien zur Einschnürung und schließlich zum Bruch des Heizers. Das Polymer verkohlt hier nur lokal, da der Heizerwiderstand am Ort der Ermüdung stark zunimmt. Abbildung 7.10 zeigt die beobachteten Defekte. Im Folgenden wird die Aktorschädigung für SU-8 und galvanisches Nickel diskutiert.



a)



b)

Abbildung 7.10.: Defekte Mikroaktoren: a) Vollständiges Verkohlen des heißen Balkens nach Überschreiten der Pyrolysetemperatur; b) Brechen des Heizers im Dauerbetrieb und lokale Überhitzung

7.6.1 Alterung von SU-8

Nach *Ehrenstein* [159] sind das kurz- und das langzeitige Verhalten von Kunststoffen unter Belastung zu unterscheiden. Das Kurzzeitverhalten wird durch das Erweichen und die physikalischen

Alterungsvorgänge bestimmt, während das Langzeitverhalten überwiegend durch den chemischen Abbau dominiert wird. Beim Langzeitverhalten kommen für die Mikroaktoren mechanische Alterungseffekte hinzu. Thermische Belastung beschleunigt die Alterungseffekte.

Beim **Kurzzeitverhalten** von SU-8 können Erweichen durch kurzzeitige hohe thermische Belastung und physikalische Alterung auftreten. Das Erweichungsverhalten wird durch die Glasübergangstemperatur bestimmt und kann für die Mikroaktoren unterhalb der Belastungsgrenze ausgeschlossen werden, da bewusst Betriebstemperaturen unterhalb der Glastemperatur gewählt werden. Die physikalischen Alterungsvorgänge sind die Folge von thermodynamisch instabilen Zuständen, wie das Auftreten von Eigenspannungen, Ausbilden einer Vorzugsrichtung oder unvollkommene Kristallstruktur. Ursache sind dabei häufig Temperaturgradienten während der Herstellung. Die Alterungsvorgänge machen sich durch Relaxation, dem Nachlassen der mechanischen Spannung bei gegebener Dehnung, oder Kriechen, dem Zunehmen der elastischen und plastischen Dehnung bei gegebener mechanischer Spannung, bemerkbar. Dabei ist die Relaxation ein reversibler Vorgang, Kriechen führt zu permanenter Verformung.

Beide Effekte sind für SU-8 bereits in der Literatur untersucht: *Lian et. al.* [160] zeigen, dass bei der Belastung einer Probe mit einer Materialspannung von 6,2 MPa bei 150 °C über 25 min. eine plastische Remanenzdehnung von ca. 0,55 % zurückbleibt. Abbildung 7.11a) zeigt das zugehörige Diagramm. Sowohl die in diesem Experiment aufgebrauchte Materialspannung, als auch die Remanenzdehnung sind ca. doppelt so hoch, wie das an den Mikroaktoren beobachtete Verhalten, entsprechen in der Proportion aber den Verhältnissen am Aktor.

Namazu et. al. [161] zeigen Relaxation bei SU-8. Der Grund für Relaxation sind zeit- und temperaturabhängige, reversible Ausgleichsvorgänge innerhalb des Materials. Bei hohen Temperaturen tritt dies schon nach wenigen Sekunden auf: Der Relaxationsmodul, das Verhältnis von augenblicklicher Spannung zur Anfangsdeformation, sinkt nach ca. 3,5 s auf 25 % des Anfangswerts. Abbildung 7.11b) zeigt das zeitliche Relaxationsverhalten kleiner SU-8-Proben bei einer Referenztemperatur von 160 °C.

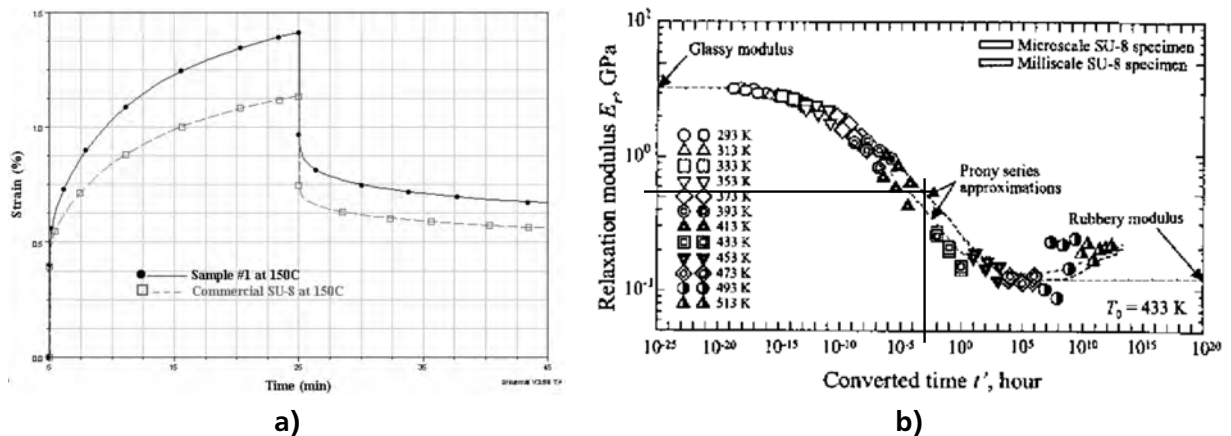


Abbildung 7.11.: Viskoelastisches Verhalten von SU-8: a) Kriechen einer Materialprobe unter 6,2 MPa bei 150 °C auf eine Remanenzdehnung von 0,55 % nach *Lian et. al.* [160]; b) Relaxationsmoduli von SU-8-Proben bei einer Referenztemperatur von 160 °C, aufgetragen über der Zeit nach *Namazu et. al.* [161] - eingezeichnet: Abfall des Relaxationsmoduls auf 500 MPa in 3,6 s

Die chemischen Alterungsvorgänge des **Langzeitverhaltens** bewirken Änderungen im molekularen Maßstab, wie Kettenspaltungen, Oxidations- oder Reduktionsvorgänge. Dies macht sich durch Versprödung, Riss- oder Kerbbildung und schließlich den Bruch des Werkstoffs bemerkbar.

7.6.2 Ermüdung von galvanischem Nickel

Die Anzahl erreichbarer Schwingspiele von metallischen Werkstoffen hängt von der mechanischen Spannungsbelastung ab. Je höher die Spannungsamplitude, desto früher versagt der Werkstoff durch Ermüdungsbruch. Dieser logarithmische Zusammenhang wird bereits im Jahr 1870 von Wöhler gezeigt [162]. *Son et. al.* ermitteln eine Wöhlerkurve für galvanisch abgeschiedenes Nickel anhand von Zugversuchen. Die Nickelproben sind aus einem Sulfamatbad abgeschieden und daher in ihren Eigenschaften mit den Heizern der Mikroaktoren vergleichbar. Die Kurve ist in Abbildung 7.12 dargestellt. Im Aktorbetrieb erfahren die Heizern aufgrund des mäandrierten Musters vornehmlich eine Biegebelastung. Daher ist die vorliegende Wöhlerkurve nicht direkt übertragbar, das qualitative Werkstoffverhalten wird jedoch sichtbar.

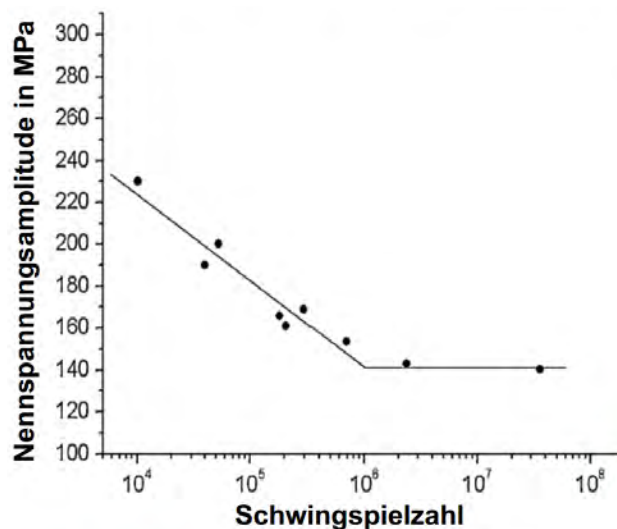


Abbildung 7.12.: Wöhlerkurve für galvanisch abgeschiedenes Nickel nach Son [163]

7.6.3 Interpretation des Aktorverhaltens

Während der ersten Betriebsminuten der Aktoren stellt sich eine permanente Nulllagenverschiebung von bis zu 30 % des Hubs ein. Die Verschiebung tritt entgegen der Betriebsrichtung auf und ist auf eine plastische Stauchung des heißen Balkens zurückzuführen. Der Grund hierfür ist Kriechen. Die im vorigen Abschnitt vorgestellten Zugversuche von *Lian et. al.* zeigen, dass Kriechen bei SU-8 innerhalb weniger Minuten auftritt. Die während des Aktorbetriebs auftretende Stauchung entsteht aus der thermischen Dehnung des heißen Balkens, der die Eigensteifigkeit der passiv mitbewegten Aktorgeometrie wie eine äußere Last entgegen wirkt. Die Ergebnisse aus der Literatur können daher nicht vollständig übertragen werden, die Größenordnung der Versuche stimmt aber gut mit den Verhältnissen am Mikroaktor überein. Unterstützt wird diese Erklärung durch die in Kapitel 4.4 diskutierte dynamisch-mechanische Analyse von SU-8-Proben. Ab einer Temperatur von ca. 100 °C beginnt der Verlustfaktor anzusteigen, es tritt Kriechen auf. Dieses Verhalten ist für elektrothermische Mikroaktoren nicht ungewöhnlich: Im Jahr 2004 stellen *Baker et. al.* an Pseudobimorph-Aktoren aus Polysilizium ebenfalls eine Nulllagenverschiebung im Leerlauf fest [164]. Als Grund wird für das polykristalline Material eine Relativbewegung der Korngrenzen vermutet.

In den zeitlich folgenden Phasen „Rückgang“ und „Wiedereinlaufen“ des Aktors (siehe Abbildung 7.8) wird innerhalb der ersten 20 min. ein Rückgang der Nulllagenverschiebung und der Wieder-

aufbau der Nulllage nach ca. 2,5 h beobachtet. Dieses zeitliche Verhalten tritt zwischen verschiedenen Aktoren und beim selben Aktor wiederholt auf. Es ist reversibel und erklärt sich durch den Prozess der Relaxation. Durch die zyklische mechanische und thermische Belastung des heißen Balkens tritt die Relaxation dort nach kurzer Zeit auf. Die Eigensteifigkeit des Balkens sinkt, es kommt durch die Eigensteifigkeit der passiv mitbewegten Aktorgeometrie zu einer Längung und damit einem Rückgang der Nulllagenverschiebung. Durch die zyklische mechanische Beanspruchung ist auch der passiv mitbewegte Teil der Relaxation unterworfen, die aufgrund der niedrigeren Temperatur später eintritt. Damit kommt es zum Wiedereinlaufen.

Ein chemischer Abbau der Aktorgeometrie, bspw. durch Rissbildung, kann nicht beobachtet werden. Für den bidirektionalen Aktorbetrieb hat die Arbeit von *Staab* bereits gezeigt, dass Materialermüdung bei SU-8 bis mehrere Millionen Zyklen kein Problem darstellt. Im bidirektionalen Betrieb können Schädigungen jedoch symmetrisch auftreten und daher lange nicht erkannt werden. Im unidirektionalen Aktorbetrieb kann auch für hohe Zyklenzahlen >40.000 keine Ermüdung bei SU-8 festgestellt werden.

Die Lebensdauer der Aktoren wird durch die mechanische Beanspruchung der metallischen Heizer begrenzt. Auch die in der Vorgängerarbeit von *Staab* entwickelten Aktoren mit galvanisch abgeschiedenem Heizer weisen eine begrenzte Lebensdauer von bis zu 6000 Zyklen auf. Mit dem hier vorgestellten spannungsoptimierten Design und der geringeren Leiterbahnbreite kann die Lebensdauer deutlich gesteigert werden. Die erreichbaren Werte liegen zwischen >45.000 Zyklen bei einer Steuerleistung von 155 mW und 900 Zyklen bei 315 mW. Die Abnahme der Lebensdauer mit ansteigender Steuerleistung erklärt sich über die in Kapitel 7.6.2 vorgestellte Wöhlerkurve.

Durch folgende Maßnahmen kann die Lebensdauer weiter gesteigert werden:

- Betrieb der Aktoren bei geringer Leistung, um die mechanische Beanspruchung des Heizers zu reduzieren.
- Spannungsoptimiertes Heizerdesign: Optimierung des Heizerpatterns auf minimale mechanische Spannungen im Betrieb.
- Einsatz von Dünnschichtheizern: *Staab* belegt, dass sich PVD-Schichten durch ihre mehr als doppelte so hohe Zugfestigkeit sehr gut als Heizer eignen. In diesem Fall muss die Heizeroptimierung auf Patterns mit einer Leiterbahnbreite von 50 µm angepasst werden.

7.7 Betriebsgrenzen der Mikroaktoren

Aus den Untersuchungen der vorigen Kapitel wird als Betriebsgrenzen für die Mikroaktoren abgeleitet:

- Durch die Optimierungsmethode lassen sich 20...30 % Auslenkung gegenüber dem Referenzaktor gewinnen.
- Bei einer Steuerleistung von 150 mW werden Auslenkungen von 50 µm bei einer maximalen Temperatur von 120 °C erreicht. Dies ist ein guter Arbeitspunkt.
- Die Nulllagenverschiebung muss durch Überdimensionierung mit ca. 25 % des Aktorhubs berücksichtigen werden.
- Die Nulllagenverschiebung kann im Entwurf durch eine intrinsische Zugspannung des heißen Balkens von 3,2 MPa modelliert werden.
- Abhängig von der Steuerleistung werden >45.000 Aktorzyklen, oder bei sehr hoher Leistung ca. 900 Zyklen erreicht.

-
- Die Ansprechzeit der Aktoren bei 150 mW ergibt sich bei Stromspeisung zu 1,9 s, bei Spannungsspeisung sind 1,4 s möglich.
 - Eine Streuung der Auslenkung von ca. 7 % ist beim Aktorentwurf zu berücksichtigen.
 - Ab einer Leistung von ca. 350 mW werden die Aktoren thermisch zerstört.
 - Als kritischer Parameter des derzeitigen Fertigungsprozesses erweist sich die Schichtdicke der Mikroaktoren, die zukünftig besser eingestellt werden muss.

In Kapitel 4 wird die Glastemperatur von SU-8-Proben bestimmt und eine Maximaltemperatur von 120 °C für den Aktorbetrieb festgelegt. Während der Aktorcharakterisierung wurden auch höhere Betriebstemperaturen bis 185 °C erreicht. Der Grund hierfür ist, dass die physikalische Obergrenze der Glastemperatur von SU-8 bei 238 °C liegt [85], die Hardbaketemperatur der Mikroaktoren aber wegen des FR-4-Substrats auf 180 °C beschränkt ist. Kapitel 4.4.3 zeigt, dass sich die Glastemperatur einer Probe mit der Hardbaketemperatur weiter steigern lässt. Die für die dynamisch-mechanische Analyse gewählte Heizrate von 1 K/min ist hoch im Vergleich zum Dauerbetrieb der Aktoren bei konstanter Steuerleistung. Daher wird die Nachvernetzung erst während des Aktorbetriebs deutlich.

Die Ergebnisse der dynamisch-mechanischen Analyse zur Temperaturabhängigkeit des Elastizitätsmoduls legen jedoch nahe, dass die Glastemperatur ein wichtiger Richtwert für die Maximaltemperatur eines elektrothermischen Polymeraktors ist und sich auch zur Auswahl geeigneter Aktormaterialien eignet.

8 Entwicklung eines haptischen Displays zur statischen Informationsdarstellung

Im folgenden Kapitel wird die Anwendung der elektrothermischen Mikroaktoren in einem Display zur Darstellung statischer haptischer Informationen gezeigt.

Basierend auf den lateralen Abständen und den Hüben von Braille-Pins können Arrays von Mikroantrieben in die Taste einer kommerziellen Fernbedienung integriert werden, um durch eine punkt-basierte Oberflächendeformation so genannte „haptische Icons“, ertastbare Symbole darzustellen. So kann besonders älteren Menschen mit zunehmender Erblindung der Tastsinn als zusätzlicher Sinneskanal zur Interaktion mit ihnen vertrauter Technik angeboten werden. Die Eignung elektrothermischer Mikroaktoren für diese Anwendung, das Ableiten von Anforderungen an haptische Icons und die Entwicklung des haptischen Displays werden nachfolgend dargestellt.

Die Ergebnisse wurden im Rahmen des wissenschaftlichen Vorprojekts „STARK - Steigerung der Lebensqualität durch tragbare, örtlich aufgelöste Displaysysteme für die taktile Kommunikation“ (BMBF FKZ: 16SV7106) in Zusammenarbeit mit der Forschungsgesellschaft für Gerontologie e.V. der TU Dortmund erarbeitet.

8.1 Tragbare haptische Bedienelemente für den demographischen Wandel

Ältere Menschen erlangen durch ihre relativ wie absolut steigende Anzahl einen bedeutenderen Stellenwert im Gefüge der Generationen. Soziale, technische wie medizinische Errungenschaften ermöglichen ihnen darüber hinaus neben einem quantitativen auch einen qualitativen Gewinn an Lebenszeit. Um die Potentiale des langen Lebens zu nutzen, müssen die Chancen zur aktiven Teilhabe gerade für ältere Menschen erhalten bleiben. Hierfür sorgt ein bedarfsgerechtes Umfeld, das mit Hilfe neuer Informations- und Kommunikationstechnik, bedarfsangepassten Wohn-, Lebens- und Betreuungsformen, sowie in zielgruppengerechten Produkten und Dienstleistungen ein selbstständiges und selbstbestimmtes Leben unterstützt. Eine adaptive und mobile Mensch-Technik-Interaktion ist eine Grundlage für den erfolgreichen Einsatzes dieser neuartigen technischen Möglichkeiten.

8.1.1 Mobile haptische Bedienelemente

Moderne Interaktionsschnittstellen nutzen mehrere Kommunikationskanäle des Menschen, um eine anwendungsspezifische Interaktion bei gleichzeitiger kognitiver Entlastung zu gewähren. Älteren Menschen vertraute Formfaktoren von Geräten reduzieren Berührungängste und vereinfachen die Akzeptanz moderner Technik. Abbildung 8.1 zeigt diesem Sinne etablierte, aber aus unterschiedlichen Kontexten entstandene handgehaltene Geräte: Das (smarte) Mobiltelefon und die traditionelle Fernbedienung für Unterhaltungselektronik.

Moderne Smartphones vereinen die akustische und visuelle, sowie die taktile Kommunikation [167] [168], und können schnell für neue Anwendungen adaptiert werden. Eine hohe Akzeptanz dieser Gerätegruppe wurde in Studien für unterschiedliche Szenarien festgestellt [169]. Die manuelle Interaktion muss visuell unterstützt werden, da der Eingabeort auf der ebenen Eingabefläche nicht taktil erfasst werden kann [170]. Untersuchungen zeigen jedoch, dass fühlbare Tasten zur verbesserten Orientierung auf Eingabegeräten gewünscht sind [171] [172]. Im Gegensatz dazu bietet die Fernbedienung eine mobile tastenbasierte Interaktion. Bruun *et. al.* (2013) [173] zeigen in einer Studie mit 67-jährigen Probanden im Vergleich von Touchscreen und Fernbedienung eine



a)



b)

Abbildung 8.1.: Etablierte handgehaltene Eingabegeräte: a) Smartphone mit Touchscreen [165];
b) Fernseh-Fernbedienung [166]

erhöhte Fehlerquote bei der Eingabe auf Touchscreens, da der Eingabeort ebenso wenig ertastbar ist, wie die vibrotaktile Eingabebestätigung. Beides bietet die traditionelle Fernbedienung. Brun et. al. erwarten eine Zunahme der Fernbedienungen im Umfeld älterer Menschen und fordern Usability-Studien. Eine moderne, alle Sinneskanäle ansprechende, Mensch-Technik-Schnittstelle kann aus der Zusammenführung der Vorteile von Fernbedienung und Smartphone entstehen. Bisher ist jedoch die dafür nötige Adaptivität tastenbasierter Schnittstellen nicht gegeben.

8.1.2 Stand der Technik für mobile Eingabegeräte

Im Stand der Technik wird zunächst auf mobile seniorengerechte Eingabegeräte eingegangen. Anschließend werden haptische Eingabegeräte für Menschen mit Sehbehinderung diskutiert und ein Fazit gezogen.

Mobile Eingabegeräte für Senioren

Als kommerziell erhältliche Eingabegeräte speziell für Senioren sind Mobiltelefone (z.B. Samsung Jitterbug, LG NS1000 oder ALVA MPO 5500) und Fernbedienungen für Unterhaltungselektronik (z.B. TV-Info-Quelle Easy, One for All URC 6210 oder Seki Slim) bekannt. Diese Geräte zeichnen sich durch wenige große Tasten aus und sind im Funktionsumfang reduziert. Abbildung 8.2 zeigt exemplarisch zwei Geräte.

In der Forschung werden mobile Geräte zur Anwendung in Health Monitoring, Navigation, soziale Vernetzung, Unfallerkennung, Smart-Home oder PC-Bedienung untersucht. Eine große Rolle spielt das Design von Mobiltelefonen als akzeptierte Geräteart [171] [176]. Das haptische Unterscheiden der Tasten und die Markierung von Tasten werden als wichtig hervorgehoben und als Gestaltungsrichtlinie empfohlen. Neben den Forderungen nach großer Schriftart, hohem Farbkontrast [177] und einfacher Menüführung [178] wird die Wichtigkeit von fühlbaren, gut unterscheidbaren Tasten betont [179] [180]. Eine Studie von Kane [181] zu mobilen Endgeräten für Senioren mit motorischer und visueller Einschränkung kommt zu dem Ergebnis, dass häufig ältere Technik, z.B. Mobiltelefone der 90er Jahre mit großen Tasten eingesetzt, oder adaptive Strategien wie



a)



b)

Abbildung 8.2.: Als seniorengerecht verkaufte Eingabegeräte: a) Handy Samsung Jitterbug [174]; b) Fernbedienung SeKi Grande [175]

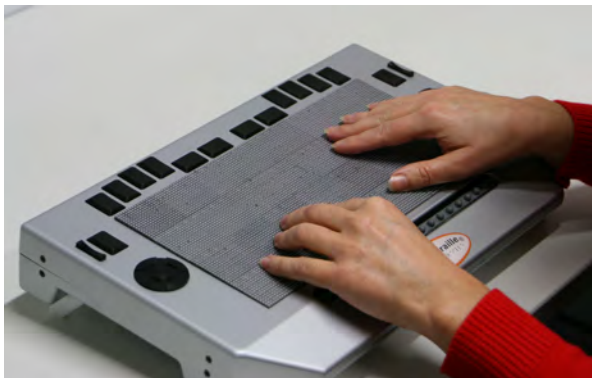
vergrößerte Textdarstellung angewendet werden. Unter den „Requested Features“ der Studie liegt der Wunsch nach haptischer Unterscheidbarkeit der Eingabeschnittstelle an dritter Stelle. Auch Häikiö [182] setzt alte Mobiltelefone mit Tastatur für Studien ein. Die positive Wirkung fühlender Interaktion wird in dem AAL-Projekt AGNES an einem handtellergrößen tragbaren Gerät zur PC-Steuerung gezeigt [183].

Aufgrund der guten Verfügbarkeit und hohen Adaptivität werden verstärkt touchscreenbasierte Geräte erforscht. Die Bildschirmdimensionen reichen dabei von Uhrengöße [184] [185] bis zum Tablet [186]. Die Eingabe erfolgt durch Antippen farblich abgegrenzter Bereiche bis zum Zeichnen von Gesten [187]. Aufgrund der hohen Fehlerquote werden große Bildschirme und große Tasten [188] empfohlen. Das Fehlen einer haptisch unterscheidbaren Eingabemöglichkeit wird dabei beklagt. Der Wunsch nach kleinen, nicht störenden oder behindernden Geräten steht dabei der Forderung nach großen, klar unterscheidbaren Tasten entgegen. Auch eine auf Senioren abgestimmte Menüführung von Geräten wird untersucht [189]. Diese Erkenntnisse werden auf die Bedienoberflächen kommerzieller Smartphones übertragen [168]. Im Januar 2014 wurde von Tactus eine Folie zum Bekleben von Touchscreens vorgestellt, die mikrofluidisch haptische Tasten erzeugt [190]. Die erzeugbaren Tastenhübe sind jedoch gering und die Nutzbarkeit für ältere Menschen nicht untersucht.

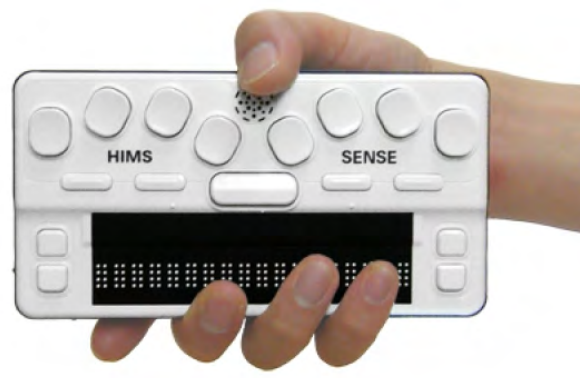
Haptische Eingabegeräte für Sehbehinderte

Punktbasierte haptische Informationsdarstellung ist aus der Braille-Schrift für Blinde bekannt: Tragbare Organizer mit Braille-Zeile und Sprachausgabe sind kommerziell erhältlich. Großflächige Braille-Displays mit Schwellpapierauflage oder das hochdynamische Hyperbraille-Display [191] werden zur Anzeige und taktilen Interaktion mit Texten und PC-Bildschirmhalten (z.B. Tabellen oder Webseiten) eingesetzt [192]. Abbildung 8.3 zeigt exemplarisch zwei Geräte. Stand der Forschung ist die Adaption von Landkarten für Sehbehinderte mit dem fokussierten Präsentieren taktiler Information jenseits von reinen Braille-Buchstaben [193] [194] [195]. In diesem Zuge wurden taktil unterscheidbare Formen, laterale und horizontale Wahrnehmungsschwellen, sowie der Einfluss von Zeichentexturen untersucht. Die Erkenntnisse aus diesen Untersuchungen quantifizieren die taktile Wahrnehmung für Zeichen und komplexe Formen ausführlich, gelten aber

für eine junge und erblindungsbedingt hoch adaptierte Zielgruppe. Die Übertragbarkeit auf eine alternde Zielgruppe kann daher nicht vorausgesetzt werden.



a)



b)

Abbildung 8.3.: Eingabegeräte für sehbehinderte: a) Braille-Flächendisplay „Hyperbraille“ der Metec AG mit 60 x 120 Stiften [196]; b) Tragbare Braille-Zeile „Braille sens U2 mini“ von Handy Tech [197]

8.1.3 Forschungsbedarf für adaptive haptische Informationsdarstellung

Die Analyse des Stands der Technik zeigt, dass die Nutzung des haptischen Sinneskanals zur Verbesserung der Mensch-Technik-Interaktion häufig begrüßt, und als die größte Schwäche moderner Touchscreen-Lösungen eingestuft wird. Aus der Erforschung haptischer Informationsdarstellung für Sehbehinderte ist Vorwissen im Stand der Technik vorhanden, die Übertragbarkeit auf die Herausforderungen des demographischen Wandels bleibt jedoch zu zeigen. Die mobilen haptischen Eingabegeräte für Blinde beschränken sich auf Braille-Zeilen und die damit verbundene ASCII-ähnliche Schrift. Eine unterstützende Lösung zur Gerätebedienung für Menschen ohne Kenntnis der Braille-Schrift und ohne jahrelange Adaption des Tastsinns ist nicht bekannt. Ebenso wenig ist eine technische Lösung für haptische Informationsdarstellung auf Basis des elektrothermischen Antriebsprinzips bekannt.

Der in dieser Arbeit verfolgte konzeptionelle und technische Ansatz ist in Abbildung 8.4 gezeigt. Es wird die nötige Adaptivität einer modernen Mensch-Technik-Schnittstelle mit den haptischen Eigenschaften eines traditionellen Handgeräts mit physikalischen Tasten vereint. Durch die Integration aktiver Elemente in die Tasten lassen sich Informationen durch Oberflächendeformation taktil darstellen und bieten adaptive und situationsbezogen fokussierte Information. Dazu werden einzelne Tasten um ein Array von ertastbaren Punkten (Taxeln) erweitert, um so genannte haptische Icons zu formen. In Abbildung 8.4 ist dies beispielhaft an der Zahl 2 gezeigt. Diese lateral ausgedehnten Icons erzeugen aus Einzelpunkten zusammengesetzt eine ertastbare Form, die in einer Höhenstufe aus der Tastenfläche herausgehoben werden kann. Diese Taxel werden statisch und ohne Vibration betrieben, um eine Alarmierung der Nutzer zu vermeiden.

8.2 Ableitung der Anforderungen an das haptische Display

Zunächst gilt es, die Anforderungen an das Display hinsichtlich lateraler Auflösung und erforderlicher Hübe zu ermitteln. Hierfür sind Studien zur Wahrnehmung von Oberflächendeformationen in der Zielgruppe, Menschen älter als 65 Jahre, nötig. Danach richten sich weitere Anforderungen



Abbildung 8.4.: Konzeptskizze einer Fernbedienung mit adaptiver haptischer Informationsdarstellung auf den Tasten

und die Konzeption eines integrierten, elektrothermisch aktudierbaren Mechanismus zur Bewegung der Taxel. Anschließend, gilt es, einen Demonstrator des Antriebs aufzubauen und zu charakterisieren.

8.2.1 Probandentest zur Quantifizierung der haptischen Wahrnehmung

Für die haptischen Icons sollen sich einfache, von einer Fernbedienung bekannte Symbole darstellen lassen, um die neue Adaptivität an bekannte Formfaktoren anzulehnen. Abbildung 8.5 zeigt typische Symbolformen. Die einzelnen Taxel sind so anzuordnen, dass sich geschlossene Linienzüge, aber auch getrennte Punkte erföhlen lassen.



Abbildung 8.5.: Typische Symbolformen einer Fernbedienung

Es ist daher nötig, den minimalen Abstand zwischen zwei Punkten zu kennen, für den sie noch als getrennte Punkte wahrgenommen werden. Diese so genannte Zweipunktschwelle bestimmt *Kaczmarek* an der Spitze des Zeigefingers in einer Studie zu 2 mm [198]. Hierfür wird die Fingerspitze meistens eingespannt und der Wert mit einem Werkzeug ähnlich einem Zirkel erfasst. Dies entspricht nicht dem vorliegenden Anwendungsfall: Bei explorativem Ertasten von Geometrien kann die Zweipunktschwelle bis zu einer Größenordnung kleiner sein. Dem entgegen steht die Tatsache, dass die Sinnesschärfe des Menschen mit dem Alter nachlässt. Daher sind hier eigene Experimente zur Ableitung von Designrichtlinien nötig.

Gleiches gilt für die Höhe der Taxel, die von *Howe* zu minimal 0,25 mm ermittelt wird [199]. Durch den Einsatz der integrierten Mikroaktoren ist ein möglichst geringer Akkorhub wünschenswert, allerdings steht das sichere Erkennen der Taxel im Vordergrund. Gerade im Hinblick auf die ältere Zielgruppe sind auch hier eigene Experimente notwendig.

Daher wird ein eigener Probandentest konzipiert und von den Projektpartnern, dem Institut für Gerontologie der TU Dortmund, in der Zielgruppe durchgeführt. Der Test besteht aus zwei Teilen: Einer Nutzerbefragung zu den Einsatzmöglichkeiten einer adaptiven Fernbedienung und einem Wahrnehmungstest zur Bestimmung der Zweipunktschwelle von Menschen in fortgeschrittenem Alter.

Konzeption des Probandentests

Als Ausgangspunkt für die eigenen Untersuchungen dient die standardisierte Braille-Schrift, die seit 1825 für blinde Menschen eingesetzt wird. Tabelle 8.1 zeigt die typischen Abmessungen.

Tabelle 8.1.: Abmessungen der Braille-Schrift nach dem „Americans with Disabilities Act“ [200]

Punktabstand	Punktdurchmesser	Punkthöhe	Kopfform
2,3...2,5 mm	1,3...1,6 mm	0,48...0,9 mm	rund

Ausgehend von diesen Werten werden folgende Parameter untersucht:

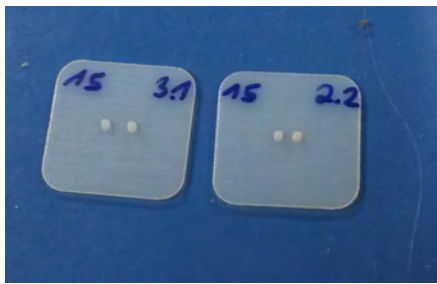
- Kopfform des Taxels: Halbkugel ($\varnothing 1,5$ mm) und quadratisch flach (Kantenlänge: 2,5 mm)
- Höhenstufen: 0,5 mm und 1 mm

Aus den Parametern folgen vier Geometrievarianten und damit vier unabhängige Testreihen. Je Testreihe werden dem Versuchsteilnehmer Testobjekte mit definierter Kopfform und –höhe, aber variierenden Abständen zweier Taxel zum explorativen Betasten präsentiert. Die Abstände werden aus Gründen der Fertigung in 10 feste Stufen von 0,2...4,7 mm festgelegt. Zur Sicherstellung der natürlichen Griffhaltung werden die Stimuli an kommerziellen, für seniorentauglich erachtete, Fernbedienungen vom Typ SeKi Grande angebracht [175]. Dieses Gerät ist in Abbildung 8.2b) dargestellt. Den Probanden wird dabei das Vorgehen beim Ertasten, vor allem der Einsatz des Daumens oder des Zeigefingers der anderen Hand, freigestellt. Sichtkontakt zum Versuchsträger darf nicht bestehen, um eine Querbeeinflussung durch den Sehsinn zu unterbinden. Abbildung 8.6a) zeigt zwei der 38 durch 3D-Druck hergestellte Proben mit halbkugelförmiger Geometrie und verschiedenen Abständen. Abbildung 8.6b) zeigt die Fernbedienungen für den Probandentest.

Quantifizierung der Zweipunktschwelle mit Hilfe der Staircase-Methode

Zur Beschreibung der menschlichen Wahrnehmung für technische Anwendungen dienen so genannte psychometrische Verfahren. Sie sind nach *Hatzfeld* in der Lage, die nur durch Wahrscheinlichkeiten beschreibbare menschliche Wahrnehmung zu quantifizieren [6]. Einem Probanden werden wiederholt Reize, genannt „Stimuli“, geboten und die Reaktionen aufgezeichnet. Eine Kombination aus Stimulus und Reaktion nennt sich „Trial“, ein Durchlauf eines psychometrischen Verfahrens besteht aus einer Folge von Trials. Ziel ist die Bestimmung der „Wahrnehmungsschwelle“, bei der die Erkennungswahrscheinlichkeit der Stimuli bei 50 % liegt.

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Staircase-Methode nach *Hatzfeld* verwendet. Diese adaptive psychometrische Methode eignet sich zur Detektion einer Wahrnehmungsschwelle. Ein simuliertes Staircase ist in Abbildung 8.7 exemplarisch dargestellt. Der Name basiert auf dem treppenförmigen Verlauf des Reizes über der Zeit. Der Versuch wird mit einem Reiz fernab der vermuteten Detektionsschwelle begonnen und schrittweise auf die Schwelle hin angepasst. Bei einer Detektionsänderung kehrt die Methode den Stimulus nach einer vorgegebenen Verlaufsregel um (Reversal), in



a)



b)

Abbildung 8.6.: Testobjekte für den Probandentest: a) Durch 3D-Druck hergestellte Proben mit halbkugelförmiger Geometrie und verschiedenen Abständen; b) Fertige Testobjekte: Fernbedienungen vom Typ SeKi Grande, beklebt mit Proben

Abbildung 8.7 beispielsweise 1up3down: Nach einer falschen Antwort wählt der Algorithmus einen höheren Stimulus. Erst nach drei richtigen Antworten wird ein niedrigerer Stimulus angenommen. Nach einer im Vorfeld festzulegenden Anzahl an Umkehrungen um die Wahrnehmungsschwelle herum, kann diese durch Mittelwertbildung der letzten Trials berechnet werden. Findet keine Annäherung statt, wird die Methode nach einer im Vorfeld bestimmten Anzahl an Trials abgebrochen.

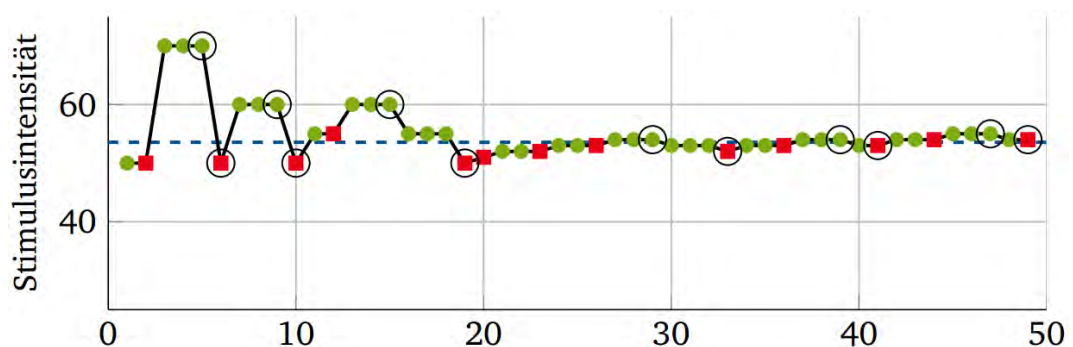


Abbildung 8.7.: Verlauf einer simulierten Staircase-Methode nach *Hatzfeld* [6]: Ein „Transformed Up-Down Staircase“ mit einer 1up3down-Verlaufsregel und einem theoretischen Konvergenzlevel von $\theta = 57,47$. Simulierte Antworten sind mit Kreisen (richtig) bzw. Quadraten (falsch gekennzeichnet, Detektionsänderungen darüber hinaus umkreist. Gestrichelt ist der aus den Versuchsdaten berechnete Schwellwert gekennzeichnet. Der theoretische Schwellwert wird in diesem Beispiel nicht genau ermittelt.

Ein ausführliches Software-Paket zur Simulation von Testreihen mit modellierten Probanden, die einstellbare und streuende haptische Eigenschaften aufweisen, ist als Ergebnis der Arbeiten von *Hatzfeld* verfügbar und wird zur Dimensionierung der Staircase-Methode eingesetzt [201]. Die Methode muss jedoch dahingehend angepasst werden, dass die Anzahl der Stimulus-Stufen auf 10 begrenzt und ihre Abstufung fest ist.

Es gilt zunächst das Konvergenzverhalten der Staircase-Methode mit festen Stimuli für verschiedene Verlaufsregeln zu prüfen. Hierfür werden Probanden mit dem in Abbildung 8.8 gezeigten Wahrnehmungsverhalten zu Grunde gelegt. Die Basisfunktion des Wahrnehmungsverhaltens entspricht einer kumulierten Normalverteilung. Der simulierte Proband in Abbildung 8.8a) hat bei einem Punktabstand von 0,8 mm die Erkennungswahrscheinlichkeit von 50 %, in Abbildung 8.8b) liegt sie bei 0,75 mm. Der Unterschied der Kurvenverläufe dient dazu, eventuelle Unterschiede in der Methodenkonvergenz festzustellen. Für ca. 10 % der Fälle können auch einzelne Punkte als zwei erkannt werden. Damit soll die erwartete Unkonzentriertheit der älteren Probanden beim Versuch modelliert werden.

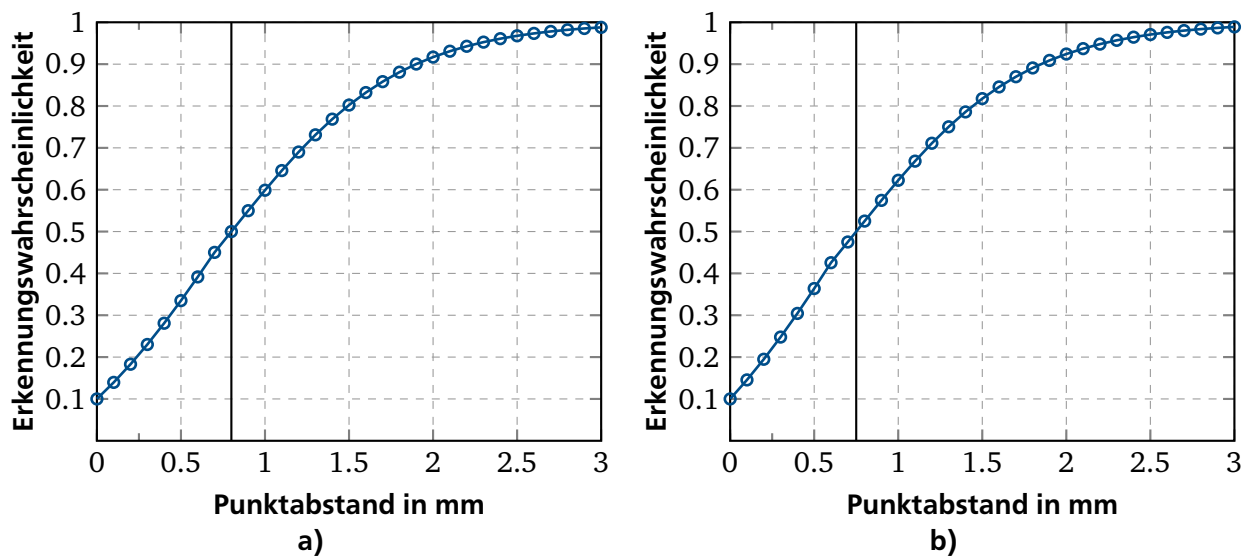


Abbildung 8.8.: Psychometrische Funktionen von zwei simulierten menschlichen Probanden: Die Erkennungswahrscheinlichkeit für zwei Punkte ist über dem Punktabstand in mm aufgetragen: a) Erkennungswahrscheinlichkeit $p = 50\%$ bei 0,8 mm; b) Erkennungswahrscheinlichkeit $p = 50\%$ bei 0,75 mm

Es werden nun Versuche mit den Verlaufsregeln der Staircase-Methode „1up1down“, „1up2down“ und „1up3down“ simuliert. Dafür werden 2000 Testreihen mit den modellierten Probanden berechnet. Es werden Stimuli mit festen Abständen präsentiert und so viele Trials durchgeführt, bis die entsprechend der Konfiguration der Methode festgelegte Anzahl Reversals, die Anzahl der Umkehrungen der Methode um den Konvergenzwert, erreicht ist. Aus den Ergebnissen wird die Zweipunktschwelle berechnet und die Abweichung von den in Abbildung 8.8 gezeigten Soll-Kurven bestimmt. Dies gibt ein Maß für die Güte der unterschiedlich konzeptionierten Testmethoden. Dabei gilt es die unterschiedlichen Konvergenzwahrscheinlichkeiten der Verlaufsregeln zu beachten: Je nach Verlaufsregel konvergiert die Methode auf einem anderen Punkt der psychometrischen Funktion und damit einer anderen Erkennungswahrscheinlichkeit.

Tabelle 8.2 zeigt die Ergebnisse für die verschiedenen Verlaufsregeln, die genauen Konfigurationen der Methoden, die zugehörigen Konvergenzwahrscheinlichkeiten, die Soll-Werte aus Abbildung 8.8, die simulierten Ergebnisse und den Standardfehler, den Quotienten aus Standardabweichung und Mittelwert, in %. Die Konfiguration der Methoden setzt sich zusammen aus der Anzahl der Reversals, den ignorierten Reversals zu Beginn des Versuchs, der Schrittweite zwischen den Stimuli und der Schrittweite bei den ersten vier Reversals, um den Konvergenzwert schneller zu finden. Die Verlaufsmethode „1up2down“ gibt nach dieser Simulation die beste Kombination aus Versuchs-

Tabelle 8.2.: Vergleich von Staircase-Konfigurationen für den Probandentest

Methode	SC 1up1down	SC 1up2down	SC 1up3down
Konfiguration	24 Reversals, 8 ignoriert	16 Reversals 4 ignoriert	12 Reversals 4 ignoriert
	Schrittweite 0,1 mm Schrittweite der ersten 4 Reversals: 0,3 mm		
Simulationsergebnis			
Konvergenzwahrscheinlichkeit in %	50	70,7	79,4
Sollwert Zweipunktschwelle in mm	0,75	1,080	1,256
Simulierte Zweipunktschwelle in mm	0,766	1,082	1,223
Standardfehler in %	17,5	16,2	16,2
Benötigte Trial-Anzahl	46	52	54

dauer (Trial-Anzahl), hoher Konvergenzwahrscheinlichkeit und geringem Fehler. Sie wird daher im Folgenden verwendet.

Nach einem ersten Vortest mit zwei Senioren zeigt sich, dass die Versuchsdauer aufgrund der begrenzten Geduldsspanne der Probanden, und damit schnell ansteigender Fehlerquote, gekürzt werden muss. Die vier Testreihen des Probandentests werden daher mit folgenden Parametern durchgeführt:

- Staircase mit je 10 fixen Schrittweiten von 0,2...4,7 mm
- 1up2down-Methode
- Maximal 30 Einzelversuche je Proband (begrenzte Zeit- und Aufmerksamkeitsspanne)
- Maximal 12 Reversals

Die Methode wird in Matlab® so implementiert, dass ein Versuchsleiter durch die Staircase-Methode der Testreihen geführt wird und den Probanden anleiten kann. Der Durchführende wird aufgefordert, den dem Algorithmus entsprechenden Stimulus, eines der in Abbildung 8.6b) gezeigten Testobjekte, an den Probanden zu geben und dessen Rückmeldung einzutragen. Die Ergebnisse werden graphisch aufgearbeitet und tabellarisch gespeichert.

Auswertung des Probandentests

Der Probandentest wird mit 42 Personen durchgeführt, aufgrund technischer Probleme sind die Ergebnisse von 38 Probanden nutzbar. Durch die hohe Teilnehmerzahl führt jeder Proband zwei der insgesamt vier Testreihen durch. Durch Randomisierung der Zuweisung werden systematische Fehler zwischen den Testreihen minimiert. Abbildung 8.9 zeigt die Histogramme der ermittelten Zweipunktschwellen.

Bis auf wenige Ausnahmen können die Probanden zwei Punkte ab einem Abstand von 2,5 mm unterscheiden, zwischen 1...2 mm ist keine klare Unterscheidung möglich. Ein Unterschied der Erkennungswahrscheinlichkeiten zwischen einer Stimulushöhe von 0,5 mm und 1 mm ist nicht erkennbar. Die Häufung der Ergebnisse für 0,2 mm bei den quadratischen Proben deutet darauf hin, dass hier der Test nicht korrekt durchgeführt wurde, oder die Probanden nicht wahrheitsgetreu geantwortet haben könnten. Dennoch zeigt sich, dass in der untersuchten Zielgruppe der älteren

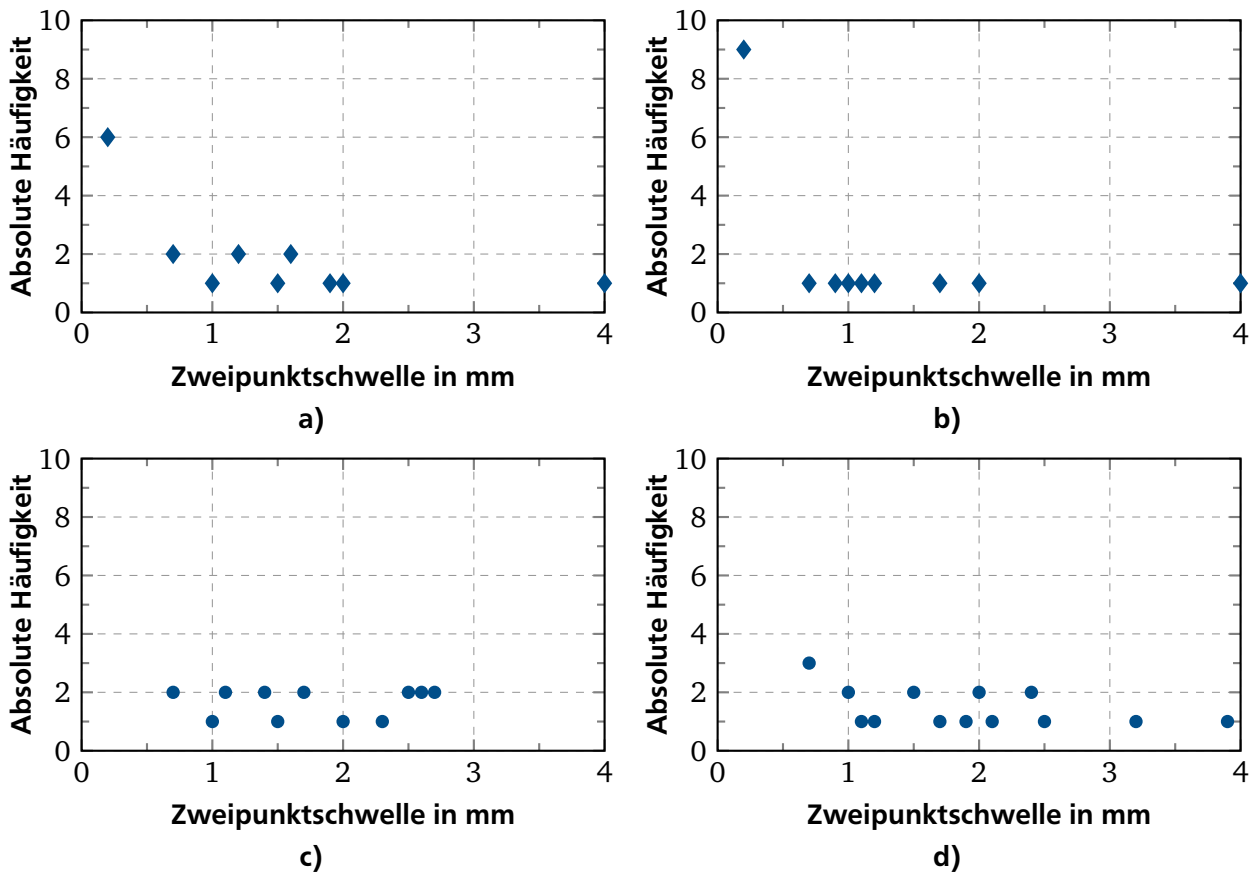


Abbildung 8.9.: Histogramme der im Probandentest ermittelten Zweipunktschwellen für a) Quadratische Stimuli mit 1 mm Höhe; b) Quadratische Stimuli mit 0,5 mm Höhe; c) Halbkugelförmige Stimuli mit 1 mm Höhe; d) Halbkugelförmige Stimuli mit 0,5 mm Höhe

Menschen ein Abstand von 2,5 mm gewahrt bleiben muss, um zwei Punkte klar unterscheiden zu können.

Da in dem haptischen Display unterschiedliche Icons dargestellt werden sollen, werden quadratische Taxel der Höhe von 0,5 mm und mit einer Kantenlänge von 2,5 mm bei einem Raster von 2,5 mm festgelegt. Die Quadrate schließen nahtlos aneinander und erlauben so die Darstellung geschlossener Linien. Durch Auslassen einer Reihe sind gut ertastbare Lücken darstellbar. Der Abstand entspricht dem des Braille-Rasters, was als sekundäres Ergebnis auch die Nutzbarkeit der Brailleschrift für ältere Menschen zeigt.

8.2.2 Sonstige Anforderungen

Das Display wird als Funktionsdemonstrator mit dem elektrothermischen Antriebsprinzip aufgebaut. Dabei kommen die in Kapitel 3 vorgestellten kostengünstigen Substrat- und Funktionsmaterialien der polymeren Oberflächenmikromechnik zum Einsatz. Die lateralen Pin-Abstände und die minimale Pin-Höhe ergeben sich aus dem Probandentest, vorgestellt in Kapitel 8.2.1. Da die elektrothermischen Aktoren kraftgetrieben sind, ist zum Einstellen und Halten einer Auslenkung eine permanente Leistungsaufnahme nötig. Beim Einsatz der Mikroaktoren als Antrieb für die Taxel soll möglichst wenig Energie verbraucht und vorwiegend die beiden Endlagen, ein- und ausgefahren, gehalten werden. Daher ist ein bistabiler Mechanismus vorzusehen. *Eicher* erklärt Bistabilität mit der Analogie einer massebehafteten Kugel im Schwerfeld der Erde, wie in Abbildung 8.10a) zu

sehen: In den Positionen A und C ist das System in einem energieärmeren Zustand, die Zwischenposition B muss durch äußeren Energieeintrag überwunden werden.

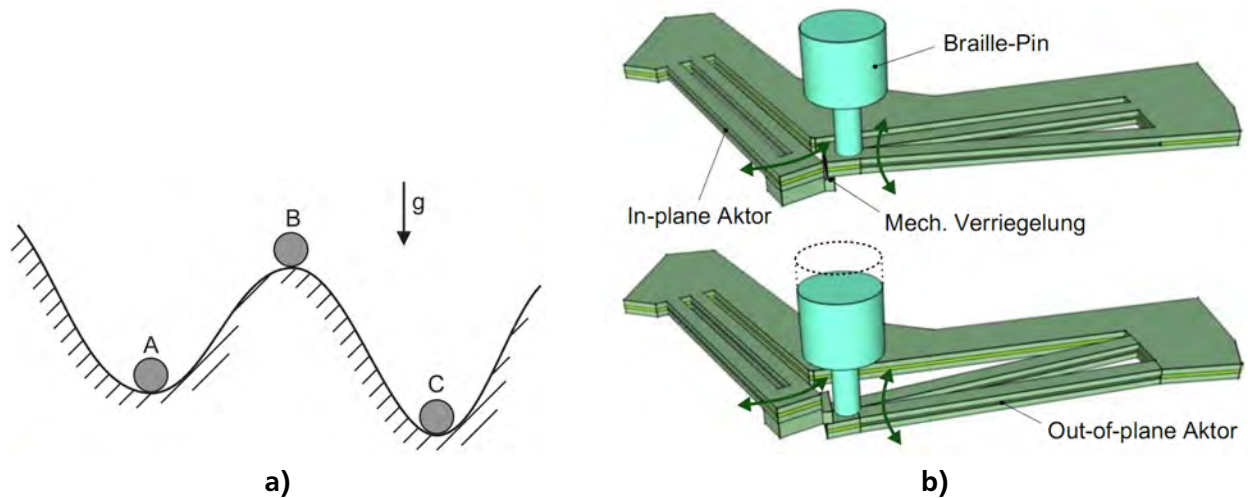


Abbildung 8.10.: Bistabilität: a) Stabile (A,C) und instabile (B) Positionen einer Kugel im Schwerfeld; b) Konzept eines elektrothermisch angetriebenen mechanisch bistabilen Mechanismus für Braille-Pins nach Staab [10]

Dies lässt sich auf den Taxelantrieb übertragen: Die Taxel sind ohne äußere Leistungszufuhr in den Endlagen zu halten. Beim Betasten von Oberflächen durch den Menschen sind nach Loomis [7] Kräfte von 50...100 mN zu erwarten, denen die Antriebe zerstörungsfrei widerstehen müssen. Dabei geht es um die Haltekraft nach Erreichen einer Endlage, während des Umschaltens ist Antriebskraft niedriger. Die Displaygröße wird auf 6 x 6 Taxel festgelegt, da sich die meisten einfachen Icons damit darstellen lassen. Die Icons nehmen eine Fläche von 15 x 15 mm² ein, was gut auf die Taste einer typischen Fernbedienung mit z.B. 19 x 19 mm² bei der SeKi Grande passt. Die Dicke kommerzieller Fernbedienungen liegen im Bereich 13...23 mm [175]. Diese maximale Bauhöhe von 23 mm soll nicht überschritten werden, um nicht von den für die Zielgruppe gewohnten Formfaktoren abzuweichen. Tabelle 8.3 fasst die Anforderungen an das haptische Display zusammen.

8.3 Mechanisch bistabiles Antriebsarray mit elektrothermischen Mikroaktoren

Staab stellt in seiner Arbeit das Konzept eines elektrothermisch angetriebenen mechanisch bistabilen Mechanismus für Braille-Pins vor [10]. Aufgebaut aus mindestens vier feinwerktechnisch strukturierten und verklebten Polymerlagen werden Pseudobimorph-Aktoren eingesetzt, um einen Braille-Pin anzuheben und mechanisch in zwei Positionen zu verriegeln. Abbildung 8.10b) zeigt das Konzept des Antriebs mit Pseudobimorph-Aktoren für In-Plane- und Out-of-Plane-Bewegungen, sowie der Verriegelung der beiden Aktoren in zwei Höhenstufen durch Überlapp des Schichtverbunds.

Das Konzept des Mechanismus wird durch den Autor und *el Khoury* optimiert [74], und für den Aufbau mit den Technologien der Oberflächenmikromechanik ausgelegt. Hierfür werden im Folgenden die drei Komponenten des Mechanismus, die Verriegelung, der In-Plane Aktor und der Out-of-Plane Aktor, diskutiert.

Tabelle 8.3.: Anforderungen an das haptische Display

Anforderung	Einheit	Wert
Taxel-Grundform	–	quadratisch
Taxel-Abstand	mm	2,5
Taxel-Höhe	mm	0,5
Kraft des Nutzers auf statisches Taxel	mN	200
Array-Größe	–	6 x 6 Taxel
Maximale Bauhöhe	mm	23
Antriebsprinzip	–	elektrothermisch
Arretierung der Taxel	–	mechanisch bistabil
Schaltenergie	–	möglichst gering
Schaltzeit	–	möglichst gering
Technologie	–	Oberflächenmikromechanik
Dicke der Polymerschichten	μm	300
Maximale Aktortemperatur	$^{\circ}\text{C}$	120
Umgebungstemperatur	$^{\circ}\text{C}$	21

8.3.1 Mechanisch bistabile Verriegelung

Kern des bistabilen Antriebs ist die formschlüssige Verriegelung, die sich im einfachsten Fall durch den Überlapp zweier SU-8-Schichten realisieren lässt. Als Dicke der SU-8-Schichten wird $300\text{ }\mu\text{m}$ gewählt. Kapitel 7 zeigt, dass dies einen guten Kompromiss zwischen mechanischer Robustheit, hohen Kräften und noch ausreichender Dynamik darstellt. Wird die Verriegelung in der selben Dicke ausgeführt, ist zum Umschalten zwischen den beiden Endlagen ein Höhenunterschied von $600\text{ }\mu\text{m}$ zu überwinden, was die Anforderung an den Pin-Hub mehr als erfüllt. Abbildung 8.11a) zeigt die mechanische Verriegelung mit zwei Schichten von je $300\text{ }\mu\text{m}$ Dicke in der Herstellungsposition, der ersten Endlage, und ausgefahren in der zweiten Endlage.

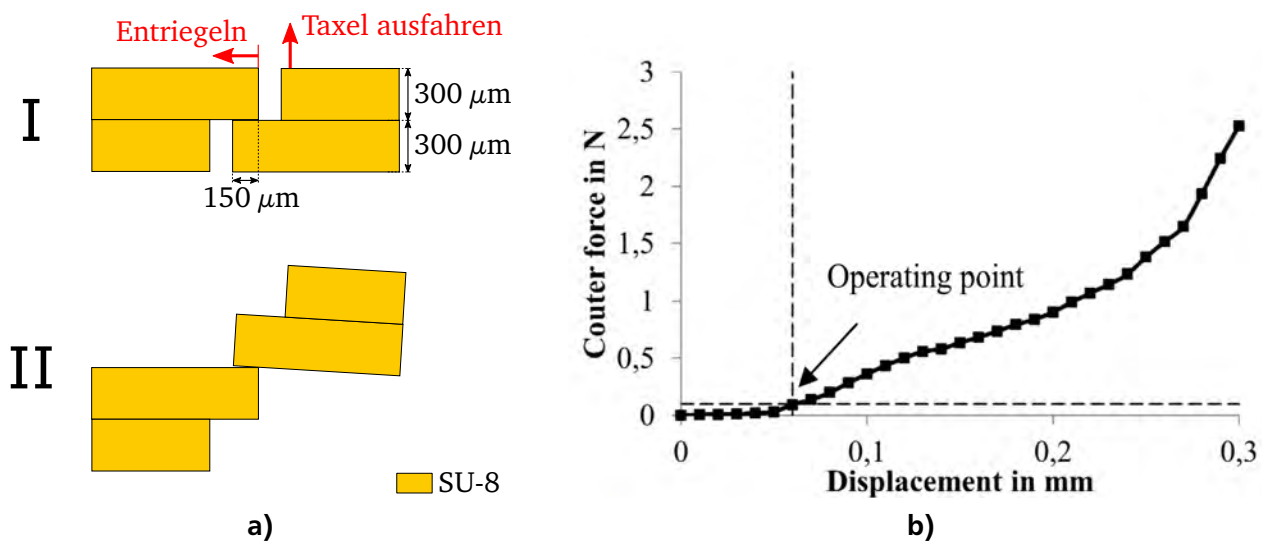


Abbildung 8.11.: Verriegelung: a) Mechanisch bistabiler Mechanismus mit zwei Polymerlagen in Herstellungsposition (I) und ausgefahrener Position (II); b) Kraft-Weg-Kennlinie zweier auf $150 \times 750\text{ }\mu\text{m}^2$ überlappender SU-8-Strukturen, belastet bis 3 N als Vorversuch zur Auslegung der Verriegelung nach [220]

Der überlappende Bereich zwischen den Schichten soll so klein wie nötig sein, um sich durch die Mikroaktoren stellen zu lassen, muss aber die durch den Nutzer einwirkenden Kräfte von bis zu 200 mN aufnehmen können. Mit zwei SU-8-Strukturen von je 300 μm Dicke, die sich auf einer Fläche von 150 x 750 μm^2 überlappen, wird ein Vorversuch durchgeführt: Ein Stempel wird auf die überlappende Fläche gedrückt und die Kraft-Weg-Kennlinie aufgenommen. Abbildung 8.11b) zeigt das Ergebnis. Bei der geforderten Kraft stellt sich eine Stauchung von ca. 60 μm ein, was sich durch eine Torsion der Verriegelung erklären lässt. Die Anordnung widersteht aber der Belastung und hält den Verriegelungszustand. Die Eindringtiefe von 60 μm ist unkritisch, da der Mechanismus um 100 μm überdimensioniert ist. Eine mechanische FEM-Simulation des mit 200 mN belasteten Schichtstapels ergibt maximale Spannungen von <4 MPa, was weit unter der Bruchspannung von 34 MPa für SU-8 liegt [202].

Die Anordnung von zwei Schichten mit je 300 μm und einem Formschluss durch seitlichen Überlapp von 150 μm eignet sich als mechanische Verriegelung: Die auftretenden Kräfte werden ohne Beschädigung aufgenommen, der Formschluss zeigt sich trotz des geringen Überlapps robust gegen ungewolltes Öffnen. Die Geometrie wird daher im Folgenden verwendet.

8.3.2 Entwurf der elektrothermischen Mikroaktoren

Für den Verriegelungsvorgang sind zwei elektrothermische Mikroaktoren nötig: Ein In-Plane Aktor zum Öffnen der Verriegelung und ein Out-of-Plane Aktor zum Anheben des Taxels.

Bei der Auslegung der Aktoren werden die in den vorangegangenen Kapiteln ermittelten Eigenschaften der Werkstoffe und Auslegeverfahren angewendet: Als maximale Betriebstemperatur wird 120 °C angenommen und die in Kapitel 7.7 für den einseitigen Betrieb bestimmte Nulllagenverschiebung wird durch eine Zugspannung von 3,2 MPa im heißen Balken berücksichtigt. Die in dieser Arbeit definierte Ansprechzeit für thermische Aktoren von $2 \cdot \tau_{\text{mech}}$ wird für das haptische Display zu Grunde gelegt. Die Aktoren werden also auf 86,5 % des aus der FEM-Simulation erhaltenen zeitlichen Endwerts ausgelegt. Die kleinsten fertigbaren Strukturweiten betragen 150 μm für den Dehnungskörper und 20 μm für den Heizer. Die Auslegung der Aktoren wird mit den in den Kapiteln 6.1 und 6.2 diskutierten Modellen und Verfahren durchgeführt.

Entwurf des Out-of-Plane Aktors

Als Grundgeometrie für den Out-of-Plane-Aktor wird der symmetrische OoP-Pseudobimorph-Aktor nach *Chen et. al.* ausgewählt. Aus der Übersicht der Aktorgrundformen in Kapitel 2.1.1 geht dieser als einzige intrinsisch temperaturkompensierte Variante eines Out-of-Plane-Aktors hervor. Der Einsatz des haptischen Displays bei sich ändernder Umgebungstemperatur steht bei diesem ersten Entwurf zwar nicht im Fokus, ist aber bereits auf Konzeptebene durch die Wahl der Grundform zu berücksichtigen.

Die Aktorgeometrie besteht aus einem inneren Balken in der unteren Lage und zwei äußeren Balken in der oberen Lage. Durch lokales Heizen des inneren Balkens hebt sich die Aktorspitze aus der Fertigungsebene heraus. Dabei sind die Lagen ohne Fügspalt angeordnet, und gewährleisten ein optimales Übersetzungsverhalten. Die oberen Balken sind zu den unteren lateral versetzt, was thermisches Übersprechen minimiert. Gestaltet man den Aktor symmetrisch hinsichtlich der Steifigkeiten von heißem und kaltem Balken - die kalten Balken halb so breit, wie der heiße Balken bei gleich dicken Polymerlagen - so tritt keine laterale Torsion auf und die Geometrie verhält sich wie der In-Plane Pseudobimorph. Die Ergebnisse der Geometrieanalyse aus Anhang C sind dann auf den Out-of-Plane Aktor übertragbar.

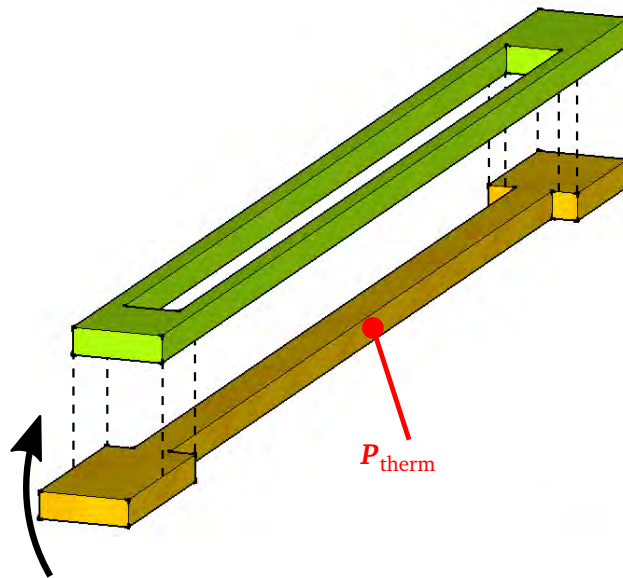
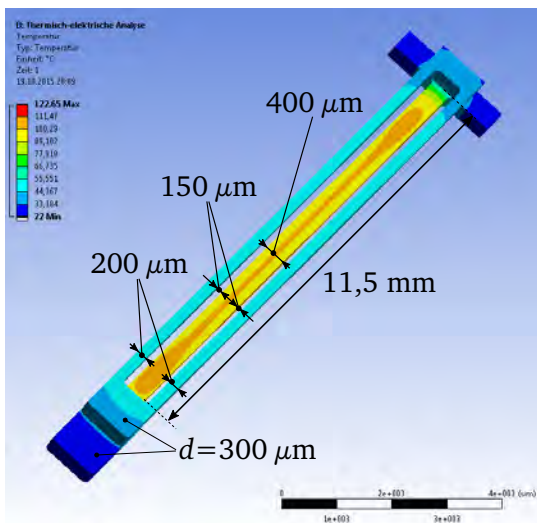
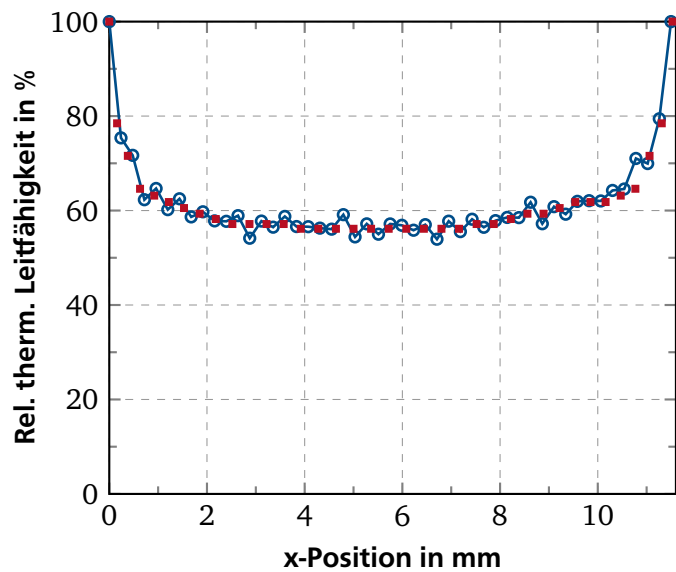


Abbildung 8.12.: Getriebegeometrie des Out-of-Plane Aktors zum Ausfahren der Taxel nach Chen et. al. [14]



a)



b)

Abbildung 8.13.: Auslegung des Out-of-Plane Aktors für das haptische Display: a) Simulierte und bemaßte Geometrie; b) Relative thermische Leitfähigkeit und normierte Leistungsabgabe des Heizers für die Auslegung nach Kapitel 6.2

Nicht berücksichtigt werden kann bei der Auslegung, dass die Aktorspitze im Betrieb vom Substrat abhebt und der unterliegende Luftspalt größer wird. Grund hierfür ist, dass das in Kapitel 6.1 vorgestellte FEM-Modell keine Wechselwirkung zwischen mechanischer und thermischer Simulation vorsieht. Durch die Veränderung des Luftspalts nimmt die Wärmeabgabe des Aktors in das Substrat ab, da der Wärmewiderstand des Luftspalts linear mit seiner Dicke steigt, und es kommt zu einer Veränderung des Temperaturprofils im heißen Balken. Es wird erwartet, dass zu einer Überschätzung der Wärmeabgabe und damit zu einer Unterschätzung des Akteurverhaltens führt. Daher wird das Modell unter dieser Einschränkung zur Auslegung des Out-of-Plane Aktors verwendet.

Die Anforderung an den Out-of-Plane Aktor ist eine Leerlaufauslenkung größer 600 μm bei möglichst kleiner Grundfläche und kleiner Leistungsaufnahme. Abbildung 8.13a) zeigt den ausgelegten und bemaßten Aktor. Das relative thermische Leitfähigkeitsprofil des zu heizenden Balkens, sowie die normierte Leistungsabgabe des Heizers sind in Abbildung 8.13b) dargestellt. Tabelle 8.4 zeigt die aus der Simulation gewonnenen Kennwerte, mit denen der Aktor für den Einsatz in dem haptischen Display geeignet ist.

Tabelle 8.4.: Simulierte Kennwerte der Aktoren für das haptische Display für eine maximale Betriebstemperatur von 120 °C

Kategorie	Einheit	Out-of-Plane	In-Plane
Leerlaufauslenkung (zeitl. Endwert)	μm	820	286
Nennleerlaufauslenkung	μm	735	247
Leistungsaufnahme	mW	393	379
Aktive Fläche	mm^2	11,5	10,9
Gesamtdicke	μm	600	300

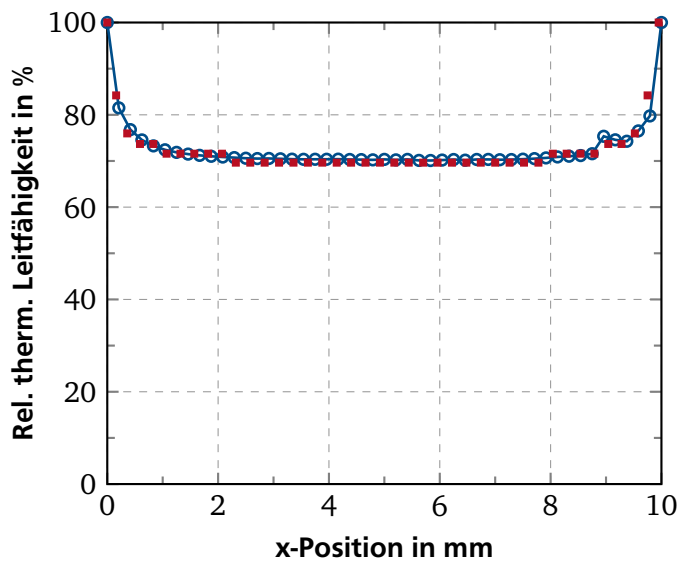
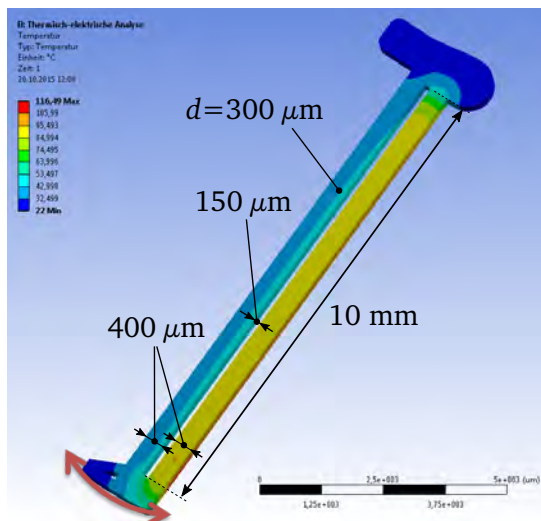
Auslegung des In-Plane Aktors

Analog zur ausführlichen Diskussion des In-Plane Aktors im Rahmen dieser Arbeit, wird der ver- und entriegelnde Aktor für das haptische Display ausgelegt.

Anforderung an den Aktor ist eine Leerlaufauslenkung größer 150 μm zum Öffnen der Verriegelung bei möglichst kleiner Grundfläche und Leistungsaufnahme. Abbildung 8.14a) zeigt den ausgelegten und bemaßten Aktor. Das thermische Leitfähigkeitsprofil des zu heizenden Balkens, sowie die normierte Leistungsabgabe sind in Abbildung 8.14b) zu sehen. Tabelle 8.4 zeigt die aus der Simulation gewonnenen Kennwerte. Die durch den Temperaturgradienten im geheizten Balken auftretende Out-of-Plane Auslenkung des Aktors beträgt 52 μm , was durch die Überdimensionierung des OoP-Aktors mit 135 μm Wegreserve berücksichtigt ist. Mit den gezeigten simulierten Kennwerten ist der Aktor zum Einsatz in dem haptischen Display geeignet.

8.3.3 Anordnung der Antriebe im Array

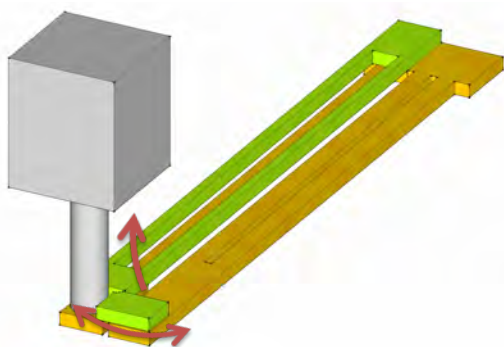
In den vorangegangenen Kapiteln werden In- und Out-of-Plane Aktoren für den bistabilen Taxelantrieb ausgelegt. Im Folgenden gilt es, die Aktoren zu dem bistabilen Antrieb zusammenzufügen und für das 6 x 6 Array mit dem Rastermaß von 2,5 mm anzuordnen. Die Auslegung der Einzelaktoren zeigt, dass sich der Gesamtmechanismus aus zwei Polymerlagen mit je 300 μm Dicke aufbauen lässt: Der In-Plane Aktor benötigt eine Polymerlage, der Out-of-Plane Aktor benötigt zwei. Wird



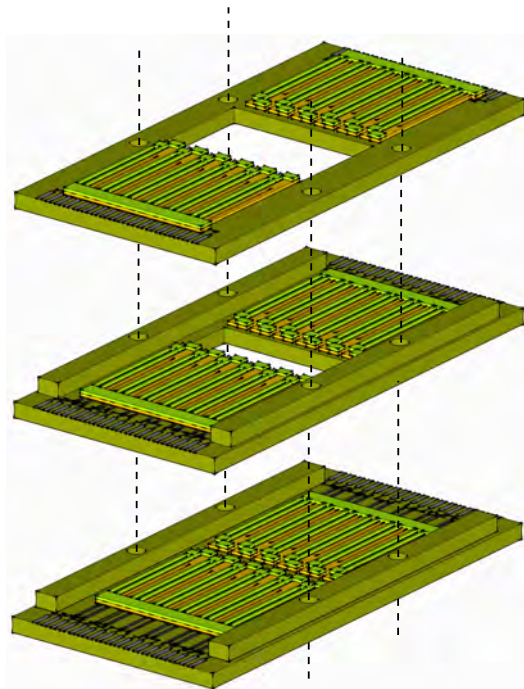
a)

b)

Abbildung 8.14.: Auslegung des In-Plane Aktors für das haptische Display: a) Simulierte und bemaßte Geometrie; b) Relative thermische Leitfähigkeit und normierte Leistungsabgabe des Heizers für die Auslegung nach Kapitel 6.2



a)



b)

Abbildung 8.15.: CAD-Modell des Antriebsarrays: a) Einzelner Antrieb mit Out-of-Plane Aktor zum Ausfahren eines Taxels, In-Plane Aktor zum Verriegeln in den Endlagen und Taxel; b) Vollständiges 6 x 6 Array, bestehend aus drei stapelbaren Modulen mit je 6 x 2 Antrieben

die Verriegelung gleichzeitig mit der oberen Lage des Out-of-Plane-Aktors auf dem In-Plane Aktor angebracht, ist der gesamte Mechanismus in zwei Lagen realisiert.

Das von *Staab* vorgestellte Konzept setzt die beiden Aktoren des Antriebs rechtwinklig zueinander auf Lücke, um ein theoretisch randloses großflächiges Pinarray im Braille-Raster, ähnlich dem Hyperbraille-Display [196], zu erzielen. Dieses und vergleichbar hoch optimierte kinematische Konzepte werden derzeit in einem eigenen Forschungsprojekt, dem BMBF-MTI-Projekt MOBILizE, untersucht. Für ein auf 6 x 6 Taxel begrenztes haptisches Icon ist kein randloses Konzept notwendig, da nur die begrenzte Fläche einer Fernbedienungstaste mit aktiven Elementen versehen wird. Der Randbereich des Displays kann unterhalb der Taste Raum innerhalb des Fernbedienungsgehäuses einnehmen. Die Aktoren eines Antriebs werden daher zueinander parallel angeordnet und im Rastermaß von 2,5 mm aneinandergereiht. Abbildung 8.15a) zeigt das CAD-Modell eines Antriebs mit Taxel.

In einer Fertigungsebene lassen sich zwei gegenüberliegende Taxelreihen zu einem 6 x 2 Modul anordnen. Abbildung 8.15b) zeigt das 6 x 6 Display, aufgeteilt in drei baugleiche Module, die sich nur in den Abständen der Taxelreihen unterscheiden und in einer Ebene gefertigt werden können. Als Substratmaterial wird das in dieser Arbeit bereits verwendete Platinenmaterial FR4 eingesetzt, das als Träger des Mikrosystems dient und gleichzeitig das mechanische Gegenlager für die Kraft durch den Nutzer darstellt. Vereinzelt man die Module im Anschluss an die mikrotechnische Fertigung und öffnet das Substrat zwischen den Antriebsreihen, lassen sich die drei Module zum 6 x 6 Antriebsarray stapeln. Auf einer Montageplattform mit Passstiften kann durch Siebdruck ein Kleber hochgenau aufgebracht und die Module gefügt werden.

8.4 Entwurf des Gesamtsystems

Nach der Dimensionierung des Antriebsarrays kann der Entwurf des Displays vervollständigt werden. Die Ankopplung der quadratischen Taxel an das Antriebsarray, die elektrische Kontaktierung der Antriebe, sowie die Integration des Displays in die funktionsfähige Taste einer Fernbedienung werden im Folgenden diskutiert.

Das **Taxel-Modul**, bestehend aus Stiften mit quadratischen Köpfen, Grund- und Deckelplatte zur Führung und einem Rahmen zur Formung der eigentlichen Taste, stellt wie bei kommerziellen Braillezeilen eine eigene Baugruppe dar. Bei häufiger Nutzung können die Taxel verschleifen und sollen daher austauschbar sein. Abbildung 8.16a) zeigt das CAD-Modell des Displays mit Antriebsarray und Taxel-Modul.

Die Stifte (weiß) werden durch die Grund- und Deckelplatten des Moduls, bestehend aus Platinenmaterial, geführt. Sie sind mit einem Ring zur Stellwegbegrenzung versehen, der zusammen mit der Dicke des umgebenden Abstandhalters den Hub der einzelnen Taxel auf die zur Verriegelung nötigen 0,6 mm begrenzt. Die Taxel selbst (rot) werden mit einem Spiel von 0,1 mm zu einander angeordnet und auf die Stifte aufgesteckt. Sie sind in einen Rahmen eingefasst, der die Taste formt. Auf diesen Rahmen wird eine für bei Fernbedienungstasten üblichen haptischen Eindruck übliche Schicht Silikonschaltmatten-Material mit der typischen Dicke von 1 mm aufgeklebt. Dies erzeugt den gewohnten haptischen Eindruck einer Fernbedienungstaste. Das nun vollständige Taxel-Modul lässt sich, genauso wie das im vorigen Kapitel diskutierte Antriebsarray, aus Stapeln von Platinenmaterial fügen und verkleben. Dabei kommen die gleiche Montageplattform und der gleiche Kleber-Siebdruck zum Einsatz. Die Stifte und die Taxel lassen sich mittels 3D-Druck herstellen.

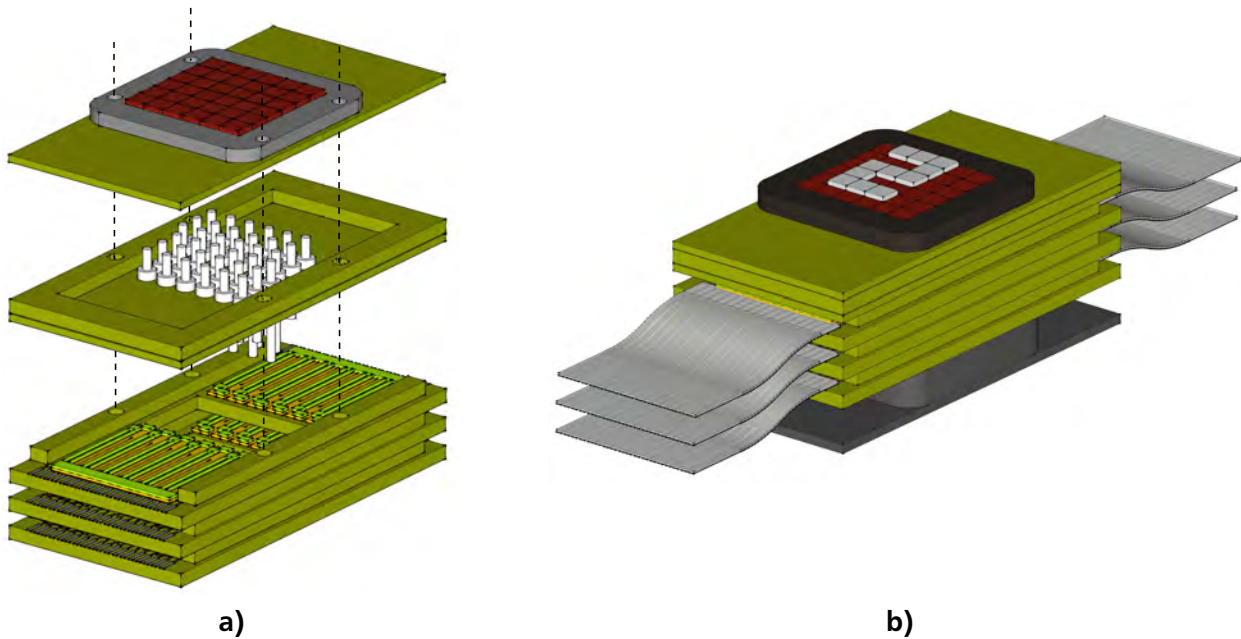


Abbildung 8.16.: CAD-Modell des haptischen Displays: a) Antriebsarray und Taxel-Modul; b) Vollständiges Display mit domförmiger Silikonschaltmatte am Boden des Antriebsarrays zur Herstellung der schaltenden Funktion und der typischen Kraft-Weg-Charakteristik und Flachbandkabeln

Da alle Module die gleichen Bohrungen für Passstifte enthalten, können Stifte in die Bohrungen des Antriebsarrays eingesetzt und das Taxel-Modul aufgesteckt werden. So wird der Austausch möglich.

Die **schaltende Funktion** einer Fernbedienungstaste wird üblicherweise durch die Silikonschaltmatte hergestellt [203], die auch als Tastenoberfläche dient. Hierzu wird in die Unterseite der domförmigen Matte eine Kontaktpille aus karbongefülltem, leitfähigem Kunststoff eingegossen, die bei Betätigung der Taste einen kapazitiven oder ohmschen Kontakt schaltet. Die Kraft-Weg-Kennlinie der Taste mit dem typischen Druckpunkt wird durch die Form der Taste und das Schaltmattenmaterial definiert. Eine solche Matte wird an der Unterseite des haptischen Displays angebracht und stellt damit den gewohnten haptischen Eindruck, sowie die elektrische Schaltfunktion her.

Die **elektrische Kontaktierung** der Antriebsarrays wird durch Flachbandkabel im 1 mm-Raster hergestellt. Je Antrieb sind drei Leiterbahnen nötig: Zwei Hinleiter zur Ansteuerung der beiden Aktoren und ein gemeinsamer Rückleiter. Diese 18 Anschlüsse pro Antriebszeile sind an den Längsseiten des Displays in Form von Kontaktpads mit 1 mm Breite im Raster von 2 mm angeordnet. So kann ein Bandkabel angebracht und die elektrische Ansteuerung beweglich herausgeführt werden. Dies ist in Abbildung 8.16b) dargestellt.

Das haptische Display wird nun mit für Leiterplattenmaterial und 3D-Druck kompatiblen Strukturabmessungen und -dicken ausgelegt. Die kleinsten feinwerktechnisch zu fertigenden Abmessungen, die minimale Dicke der Leiterplatten und der Durchmesser der Stifte, liegen bei 0,8 mm. Damit ergibt sich ein gesamter Bauraum des Systems von $45,5 \times 22,5 \times 12 \text{ mm}^3$ zuzüglich der Dicke der Schaltmatte von 4 mm, die in einer Fernbedienung Platz finden müssen. Diese maximal nötige Bauhöhe von 16 mm ist geringer als die geforderte Bauhöhe. Das haptische Display kann daher nach der hier gezeigten Auslegung aufgebaut werden. Abbildung 8.17 zeigt die beispielhafte Integration des haptischen Displays in die Fernbedienung aus Abbildung 8.4.

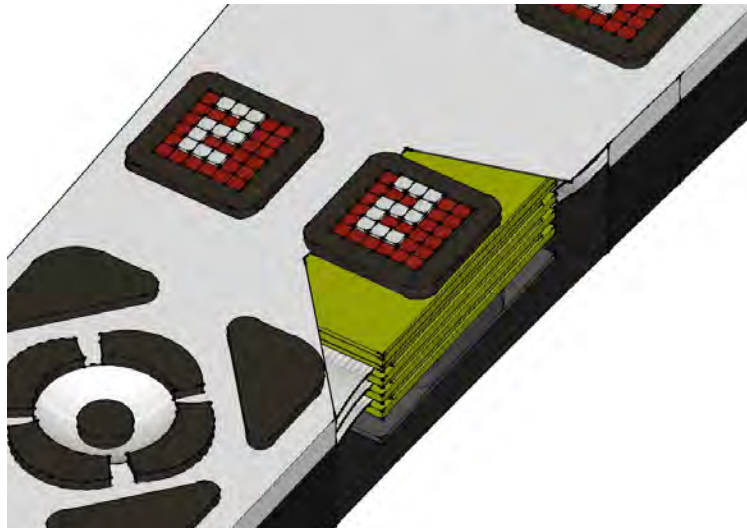


Abbildung 8.17.: CAD-Modell des in die Fernbedienung aus Abbildung 8.4 integrierten haptischen Displays

8.5 Fertigung des haptischen Displays

Das fertig ausgelegte haptische Display wird in den Laboren des Instituts EMK aufgebaut. Im Folgenden wird zunächst die Schichtfolge der mikrotechnischen Fertigung dargestellt und im Anschluss auf die Herstellung der feinwerktechnischen Komponenten, sowie den Zusammenbau eingegangen.

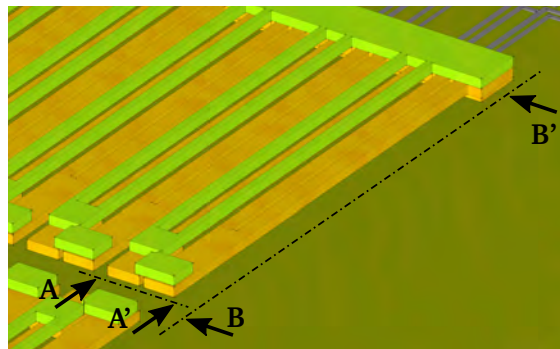


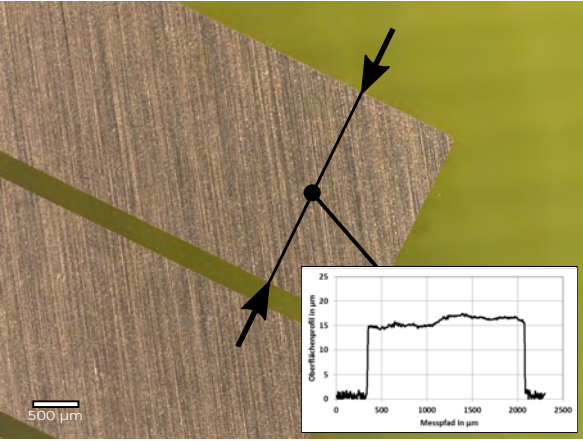


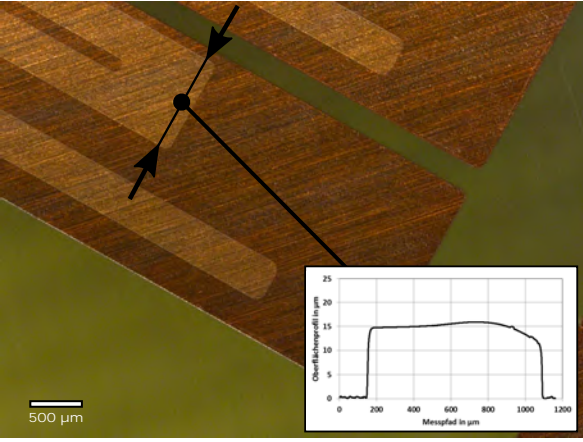


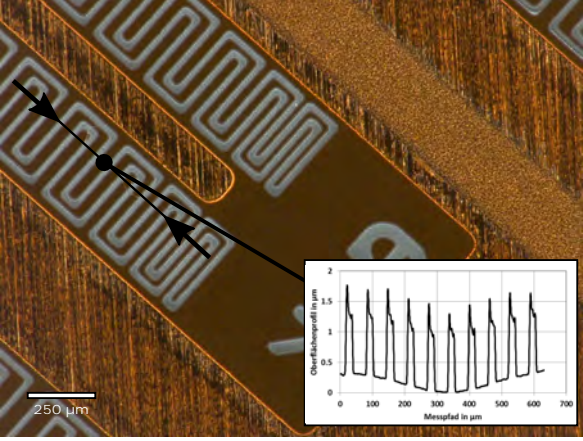


Abbildung 8.18.: Schnitte durch das Antriebsarray zur Darstellung der Schichtfolge

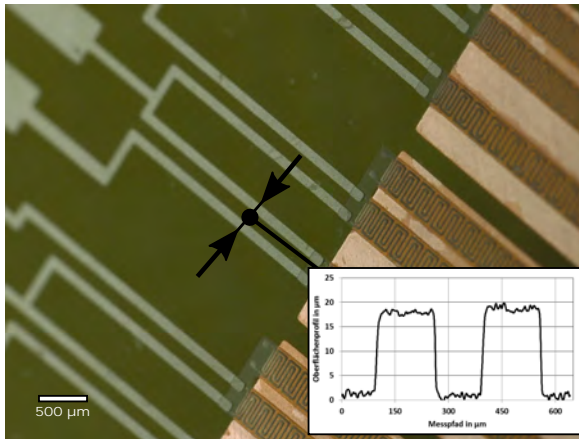
8.5.1 Mikrotechnische Fertigung des Antriebsarrays

Die mikrotechnische Fertigung des Antriebsarrays folgt der in Kapitel 7.1 vorgestellten Fertigung von In-Plane Aktoren. Für den neuen Out-of-Plane Aktor wird das System um eine auflaminierte und lithographisch strukturierte SUEX-Schicht ergänzt. Die Versuche hierfür sind in Kapitel 3.3.4 erläutert. Zur Freistellung beider Aktoren gegeneinander ist eine Passivierung der Verriegelung über dem Out-of-Plane Aktor nötig. Diese wird durch Aufbringen einer Metallisierung kombiniert mit einer Schicht aus AZ9260 erreicht. Die zugehörige Prozessentwicklung findet sich in Kapitel 3.3.3.

Tabelle 8.5 zeigt die Schichtfolge anhand von Fertigungsfotos mit Oberflächenprofil und das Prozessschema in zwei Schnittansichten. In Abbildung 8.18 sind die Schnitte zu sehen.

Tabelle 8.5.: Schichtfolge des Antriebsarrays mit Fertigungsfotos, Oberflächenprofil und Prozessschema

Fertigungsfoto und Oberflächenprofil	Prozessschema
	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div> <p>A-A'</p>  </div> <div> <p>B-B'</p>  </div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; margin-top: 10px;"> FR4 AZ 9260 Cr Cu </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; margin-top: 5px;"> Ni SU-8 SU-8/Ni SUEx </div>
	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div> <p>A-A'</p>  </div> <div> <p>B-B'</p>  </div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; margin-top: 10px;"> FR4 AZ 9260 Cr Cu </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; margin-top: 5px;"> Ni SU-8 SU-8/Ni SUEx </div>
	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div> <p>A-A'</p>  </div> <div> <p>B-B'</p>  </div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; margin-top: 10px;"> FR4 AZ 9260 Cr Cu </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; margin-top: 5px;"> Ni SU-8 SU-8/Ni SUEx </div>

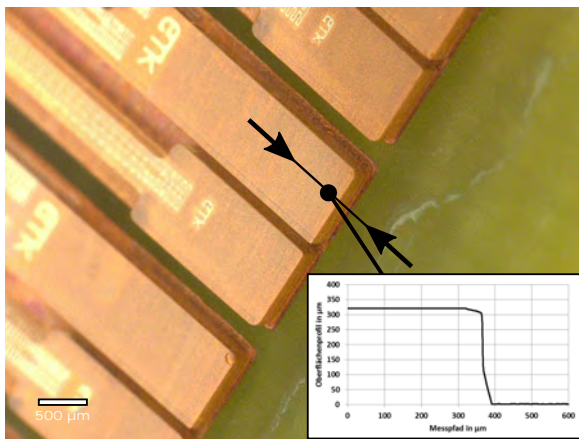


A-A'

B-B'



FR4 AZ 9260 Cr Cu
Ni SU-8 SU-8/Ni SU-EX

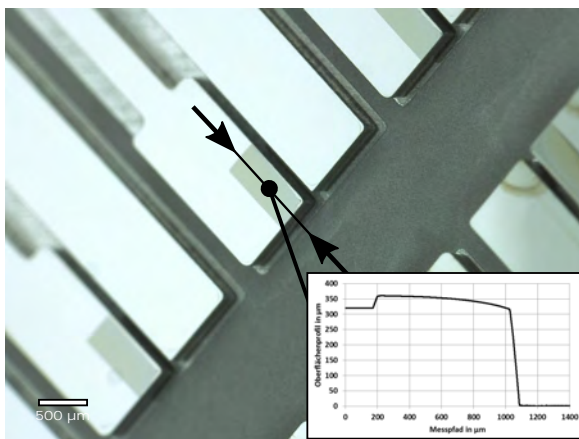


A-A'

B-B'



FR4 AZ 9260 Cr Cu
Ni SU-8 SU-8/Ni SU-EX

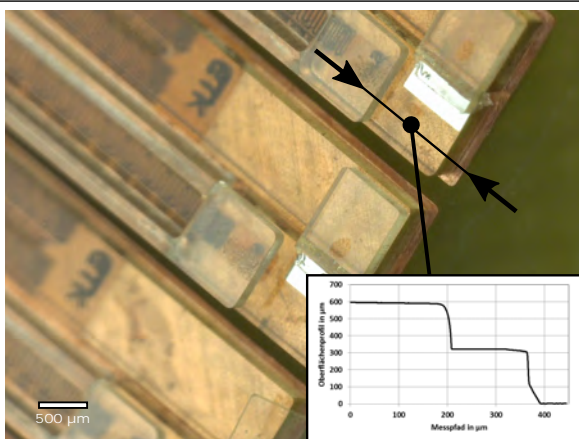


A-A'

B-B'

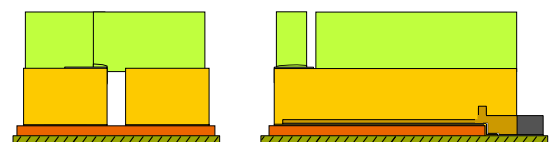


FR4 AZ 9260 Cr Cu
Ni SU-8 SU-8/Ni SU-EX

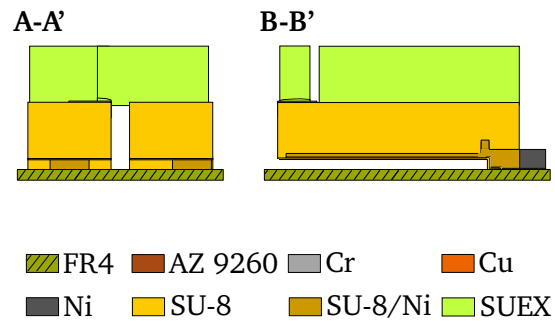
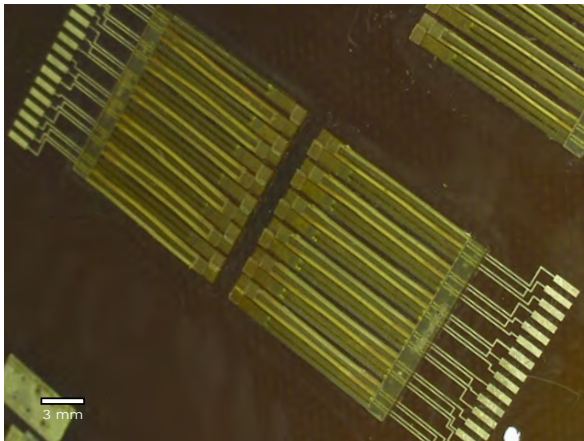


A-A'

B-B'



FR4 AZ 9260 Cr Cu
Ni SU-8 SU-8/Ni SU-EX



8.5.2 Feinwerktechnischer Aufbau und Montage

Die im Waferverbund fertiggestellten Antriebsarrays werden durch Mikrofräsen auf der CNC-Fräsmaschine Datron M10pro+ zu stapelbaren Modulen vereinzelt. Abbildung 8.19 zeigt die Module. Die Abstandshalter zwischen den Modulen, sowie die Grundplatte, Rahmen und Deckelplatte des Taxel-Moduls (siehe Abbildung 8.16a)) werden ebenfalls durch Mikrofräsen aus kostengünstigem Platinenmaterial in den Standarddicken von 0,8 und 1,5 mm strukturiert.

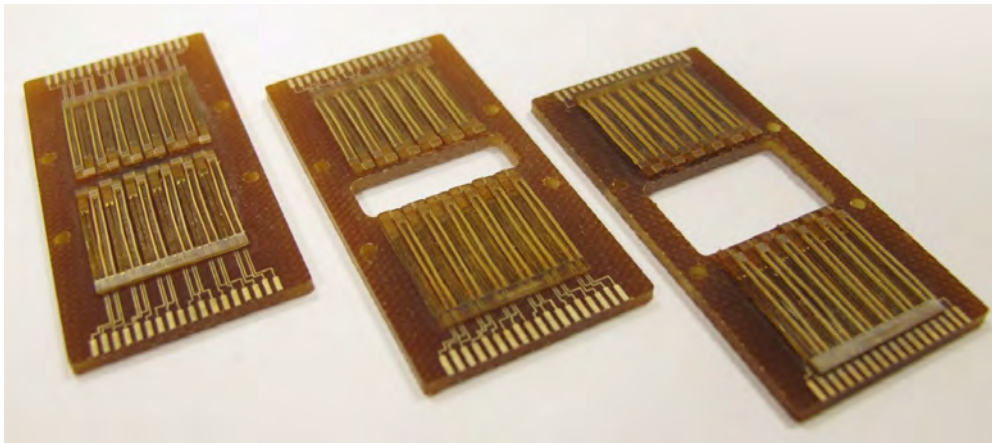


Abbildung 8.19.: Durch Mikrofräsen vereinzelt Antriebsarrays

Die einzelnen Komponenten werden auf einer Montageplattform über Passstifte gefügt und mit dem 2K-Epoxidharzkleber vom Typ UHU Plus schnellfest verklebt. Abbildung 8.20a) zeigt die gestapelten und verklebten Antriebsmodule und, mit etwas Abstand aufgesteckt, das gefügte Taxelmodul. Hier sind auch die Stifte und Taxel (rot) zu sehen. Diese Teile werden auf einem 3D-Drucker vom Typ B9 Creator gefertigt. Dieser Stereolithographiedrucker erzeugt Strukturen $>30 \mu\text{m}$ durch Belichtung eines UV-vernetzenden Harzes. Durch die derzeit große Fertigungstoleranz der gedruckten Komponenten von $+4...+20 \%$ der Nennmaße und die Gratbildung beim Fräsen der Platinen ist beim Aufbau des Taxel-Moduls manuelle Nacharbeit notwendig. Die $6 \times 6 = 36$ Taxel werden gefügt und das Modul aufgesteckt. Damit ist das haptische Display vollständig aufgebaut und spritzwassergeschützt verschlossen.

Bei dem derzeitigen manuellen Fertigungsprozess erweist sich die korrekte Einstellung des Abstands zwischen Spitze des Mikroantriebs und Taxel als problematisch. Der Abstand bestimmt die

nötige Länge der Stifte und damit den Hub der Taxel. Der Abstand ist abhängig von den sich aufsummierenden Höhentoleranzen der gestapelten Platinenlagen. Gründe dafür sind das manuelle Fügen und die Kleberschichtdicken zwischen den Lagen. Für eine großtechnische Fertigung lassen sich die Höhentoleranzen aber bestimmen und die Stifthöhe entsprechend anpassen. Die prinzipielle Machbarkeit des Displayaufbaus ist auf diese Weise gezeigt. Das vollständige Display ist in Abbildung 8.20b) zu sehen.

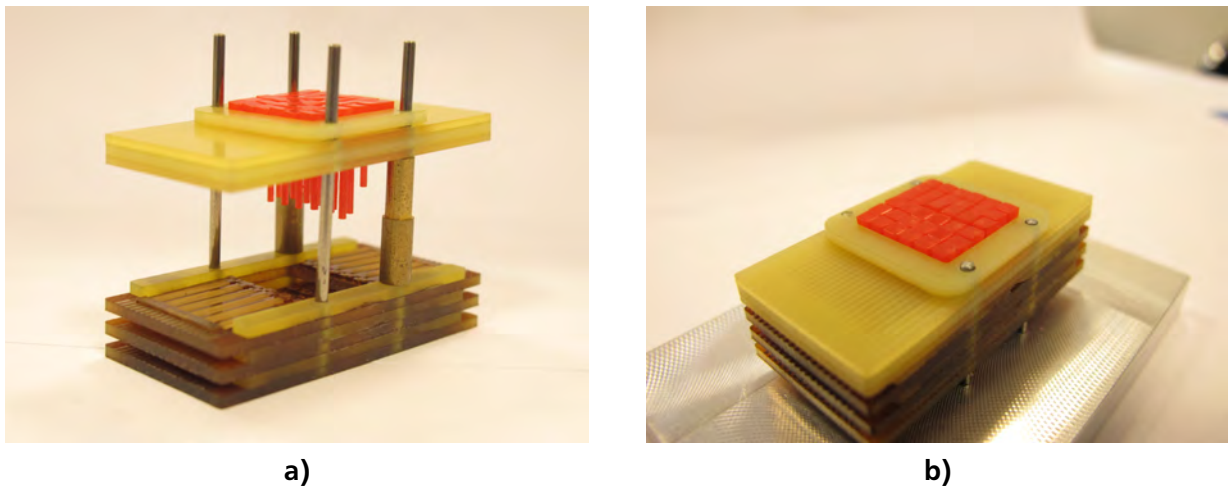


Abbildung 8.20.: Aufgebautes haptisches Display: a) Gefügte Antriebsmodule und Taxel-Modul an Passstiften; b) Vollständig gefügtes Display

8.6 Charakterisierung des haptischen Displays

Im Folgenden wird das aufgebaute haptische Display vermessen. Analog zu Kapitel 7 erfolgt die Charakterisierung der elektrothermischen Mikroaktoren durch die Strom- oder Spannungssprungantwort und die statischen Kennlinien von Maximaltemperatur und Auslenkungen. Es kommen die in Kapitel 3.2 vorgestellten Messeinrichtungen für In-Plane- und Out-of-Plane-Messungen zum Einsatz.

8.6.1 In-Plane Aktor

Die statischen Kennlinien des In-Plane Aktors sind in Abbildung 8.21 gezeigt. Die Auslenkung, die Nulllagenverschiebung und die Temperatur sind in Abhängigkeit der elektrischen Leistung aufgetragen. Mit einer Steuerleistungen bis 110 mW werden Auslenkungen bis 171 μm mit einer maximalen Betriebstemperatur bis 57 $^{\circ}\text{C}$ erreicht. Bei der niedrigen Temperatur sind die Nulllagenverschiebungen vernachlässigbar klein. Aufgrund des mit $R_{\text{IP}} = 865,6 \Omega$ sehr hohen Heizwiderstands ist mit dem verfügbaren Messplatz keine Charakterisierung bei höheren Leistungen möglich, die erreichten Auslenkungen erfüllen jedoch bereits die Anforderung von 150 μm Sollauslenkung zur Entriegelung des Out-of-Plane Aktors.

In Abbildung 8.22 zeigt ist die Stromsprungantwort des Aktors dargestellt. Sie zeigt nach Kapitel 7.4 erwartete Verhalten. Bei der Ansprechzeit von 2,1 s wird die Sollauslenkung von 150 μm erreicht. Damit ist der Aktor mit einer Steuerleistung von 110 mW für den Einsatz in dem haptischen Display geeignet.

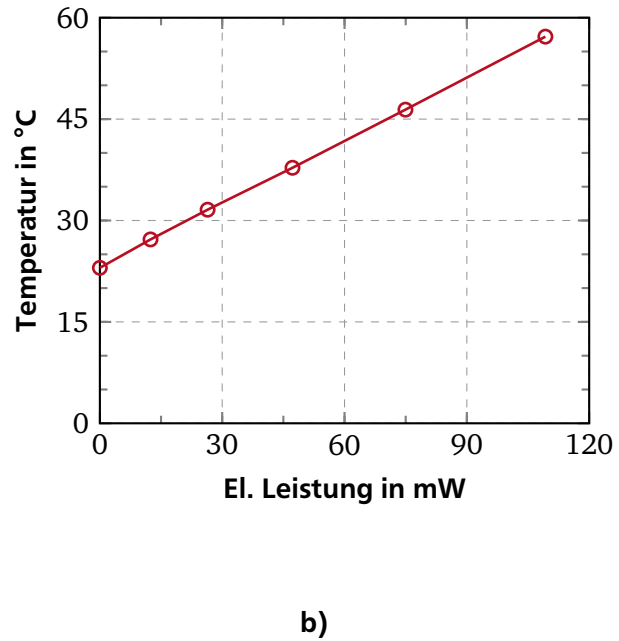
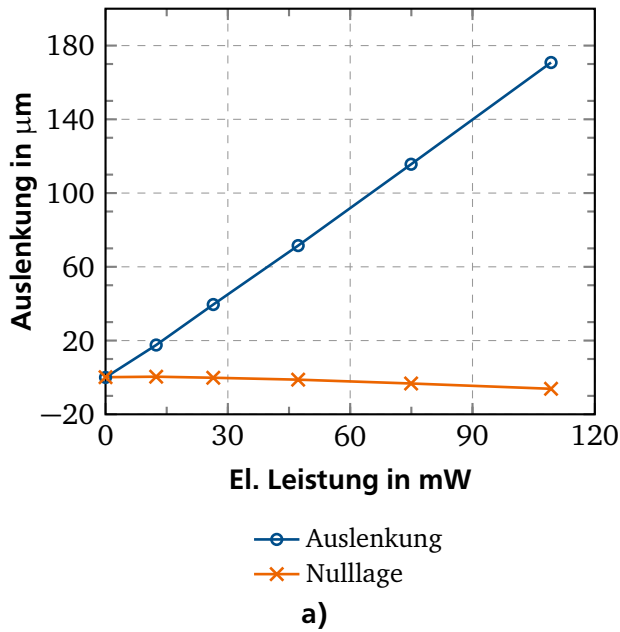


Abbildung 8.21.: Charakterisierung des In-Plane Aktors: a) Statische Kennlinie mit Auslenkung und Nulllagenverschiebung in Abhängigkeit der Steuerleistung; b) Maximaltemperatur in Abhängigkeit der Steuerleistung

8.6.2 Out-of-Plane Aktor

Für den Out-of-Plane Aktor ist zunächst das dynamische Verhalten zu betrachten. In Abbildung 8.23 sind Spannungssprungantworten des Aktors bei ansteigenden Steuerleistungen dargestellt. Auffällig ist das bei ca. 2,5 s auftretende und mit der Steuerleistung prägnanter werdende Überschwingen der Aktoren. Es erklärt sich über die Veränderung der thermischen Randbedingungen während der Bewegung. Kapitel 7.4 zeigt anhand von In-Plane Aktoren das charakteristische Aktorverhalten bei Spannungsanregung: Nach einem schnellen Anstieg der Aktorauslenkung innerhalb der ersten Betriebssekunden erwärmt sich der Heizer und hemmt die Leistungsaufnahme. Dies ist hier ebenso zu beobachten. Hinzu kommt, dass sich der Aktor in der Bewegung vom Substrat weg-

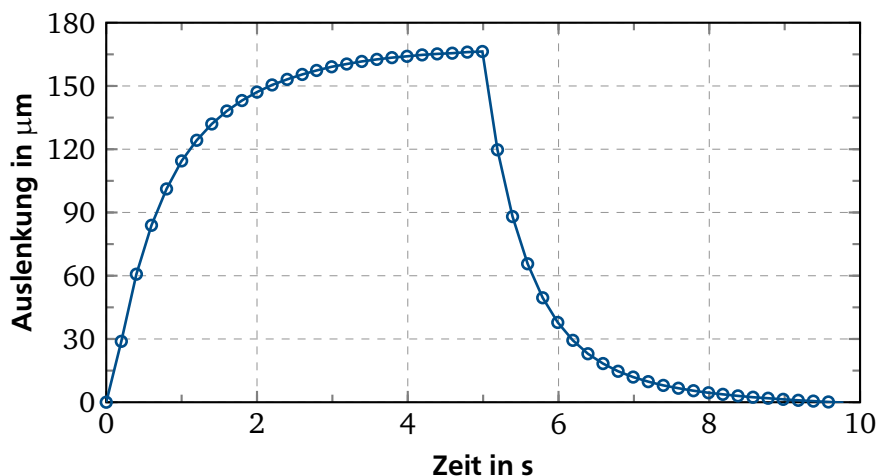


Abbildung 8.22.: Stromsprungantwort des In-Plane Aktors bei 110 mW

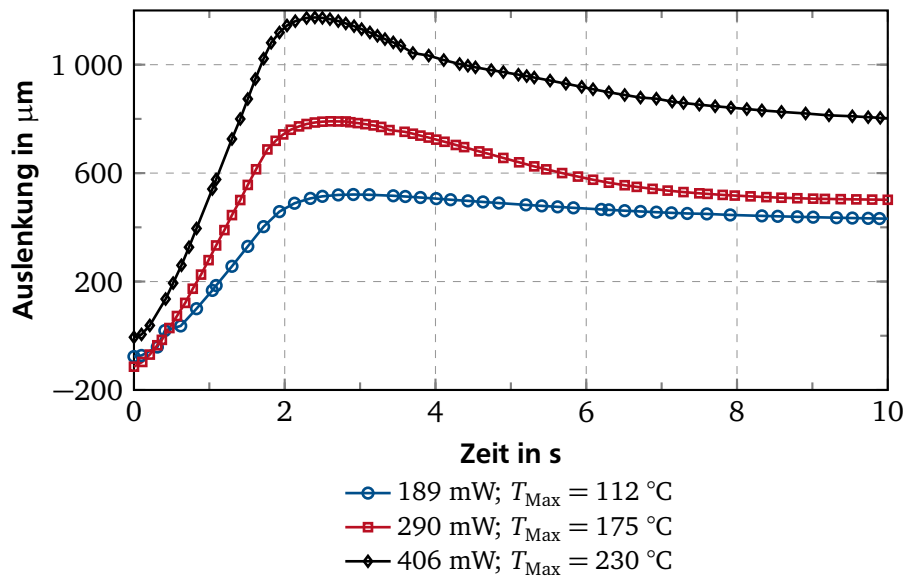


Abbildung 8.23.: Spannungssprungantwort des OoP-Aktors für ansteigende Steuerleistungen

krümmt und so seine thermischen Randbedingungen ändert: Die hohe thermische Leitfähigkeit des Luftspalts ist für die vorderen 2/3 der Aktorlänge nicht mehr gegeben und führt dort zu einer Überhitzung, was die Leistungsaufnahme weiter hemmt und die Auslenkung über ca. 4 s reduziert. Dieser Abfall auf den zeitlichen Endwert ist jedoch so träge, dass er für den Einsatz im haptischen Display keine Rolle spielt.

Betrachtet man die statischen Kennlinien von Temperatur und Auslenkung in Abbildung 8.24, zeigt sich analog zu den In-Plane Aktoren eine mit der Steuerleistung ansteigende Nulllagenverschiebung, die sich für große Leistungen ab 250 mW wieder reduziert. Die Diskussion des Aktorverhaltens in Kapitel 7.6 legt nahe, dass sich hier thermisch bedingtes Kriechen zeigt. Soll die nötige Auslenkung von $>600\text{ }\mu\text{m}$ erreicht werden, sind hohe Steuerleistungen $>250\text{ mW}$ nötig, was Betriebstemperaturen jenseits von 150°C zur Folge hat. Dies ist mit den gewählten Geometrien und Materialien möglich, reduziert jedoch die Lebensdauer, wie Kapitel 7.6 zeigt.

Als Arbeitspunkt wird der Betrieb des Aktors mit 290 mW gewählt, bei dem sich die erforderliche Auslenkung von $684\text{ }\mu\text{m}$ zum Schließen der Verriegelung nach 1,6 s einstellt. Die Auslenkung des Aktors bleibt hinter den Erwartungen der Auslegung zurück. Hier bietet sich hinsichtlich Auslegung und Fertigung Verbesserungs- und Forschungsbedarf.

Abbildung 8.25 zeigt zwei typische **Toleranzen** während der **Fertigung**: Ist die untere SU-8-Schicht zu hoch, oder der Walzenabstand beim Laminieren zu gering gewählt, pressen sich beide SU-8-Schichten ineinander, die Symmetrie des Dehnungskörpers geht verloren und die Auslenkung des Aktors reduziert sich. Ebenso kann es während des Postbake zum Fließen der dünnen Balken in der oberen Schicht kommen, was ihre Biegesteifigkeit und damit ebenfalls die Aktorauslenkung reduziert. Grund hierfür sind Kapillarkräfte während des Postbake, die das unbelichtete, flüssige SUEX in die Gräben des unterliegenden SU-8 ziehen, und damit die belichteten Areale verformen. *el Khoury* zeigt, dass der identische Fertigungsprozess bei substratfreien Strukturen aus zwei SUEX-Schichten nicht zu Verformungen führt [220] und die Strukturen zuverlässig hergestellt werden können.

Die **Auslegung** des Aktors berücksichtigt die sich mit der Auslenkung ändernden thermischen Umgebungsbedingungen nicht, da das FEM-Modell nicht über eine mechanisch-thermische Rückkopp-

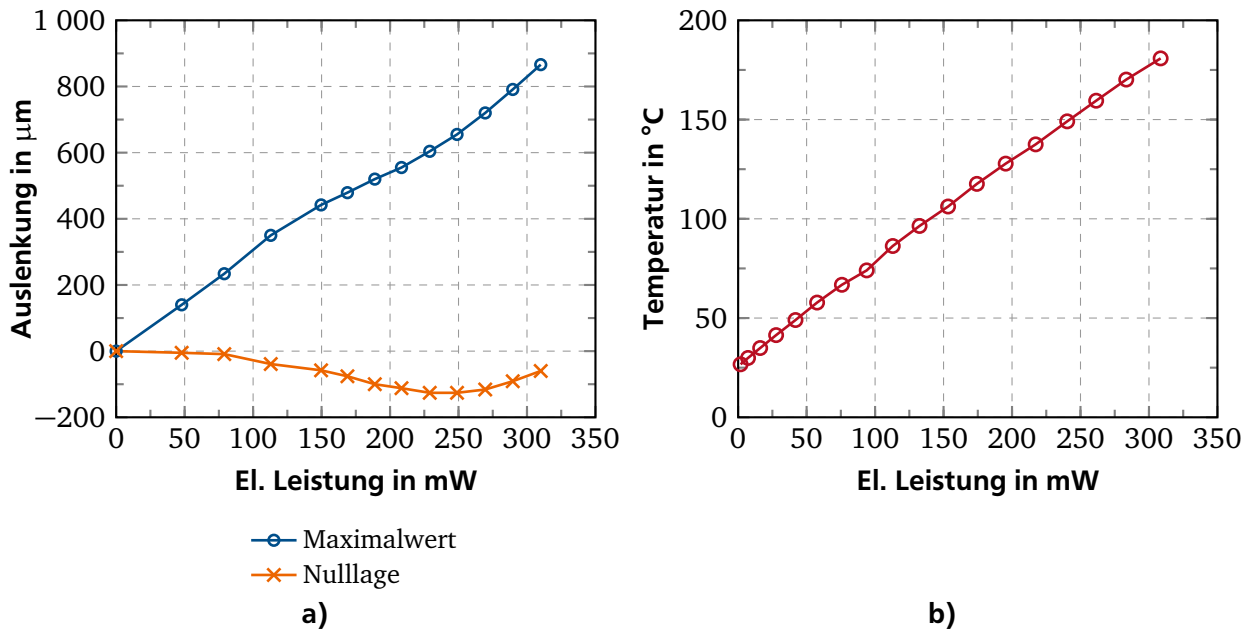


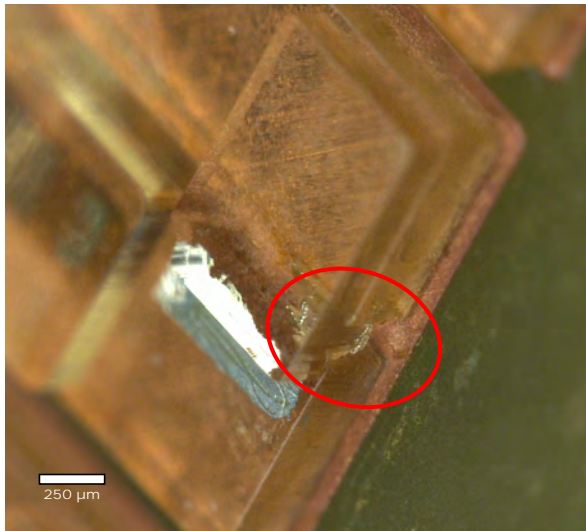
Abbildung 8.24.: Charakterisierung des OoP-Aktors: a) Statische Kennlinie mit maximaler Auslenkung und Nulllagenverschiebung in Abhängigkeit der Steuerleistung; b) Maximaltemperatur in Abhängigkeit der Steuerleistung

lung verfügt. Die Folge zeigt sich in Abbildung 8.26: Der für laterale Aktorbewegungen optimierte Heizer führt nun zu einer Überhitzung und Verkohlung im vorderen Drittel des dargestellten Aktors. *el Khoury* untersucht die selbe Aktorgeometrie ohne Substrat und die damit verbundene Änderung der thermischen Randbedingungen [220]. Bei Temperaturen bis 100 $^{\circ}\text{C}$ weisen diese Aktoren eine Auslenkung von ca. 600 μm auf. Dies zeigt, dass die Anpassung des Heizers auf die neuen thermischen Gegebenheiten zu einer ausreichenden Leistungsfähigkeit der hier vorgestellten Aktoren führen kann.

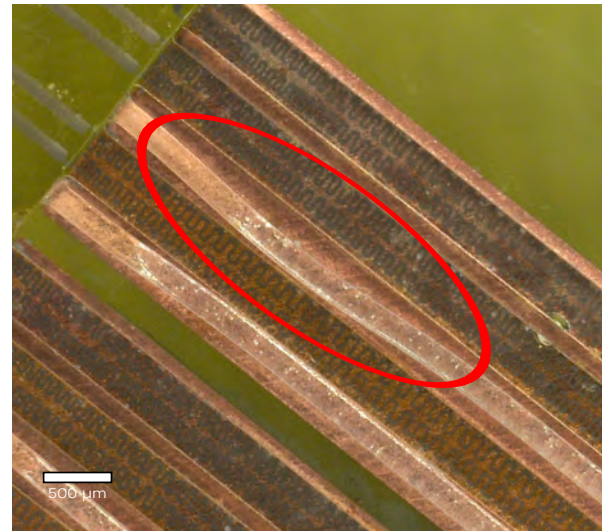
8.6.3 Schaltvorgang

Zum Abschluss der Charakterisierung ist in Abbildung 8.27 der Zeitverlauf eines Schaltvorgangs mit den oben gezeigten Aktoren dargestellt. Der Schaltvorgang gilt als abgeschlossen, sobald der In-Plane Aktor die Verriegelung geschlossen hat und der Out-of-Plane Aktor abgeschaltet wird. Die Schaltzeit beträgt 5,16 s. Bei den Aktorleistungen $P_{\text{IP}} = 110 \text{ mW}$ und $P_{\text{OoP}} = 290 \text{ mW}$ wird eine Energie von 1,26 Ws pro Schaltvorgang aufgenommen.

Der Betrieb des In-Plane Aktors führt zur Erwärmung der Umgebung und zu parasitären lateralen Auslenkungen der benachbarten Out-of-Plane Aktoren. Der antriebseigene Aktor bewegt sich um 65 μm in Entriegelungsrichtung. Während des Schaltens ist der OoP-Aktor in dieser Zeit aber im Betrieb und eine Verriegelung ist nicht nötig, oder er hat bereits seine Fertigungslage erreicht und erwartet das Schließen der Verriegelung. In beiden Fällen stellt die laterale Auslenkung kein Problem dar. Der OoP-Aktor des benachbarten Antriebs verschiebt sich um 24 μm in Verriegelungsrichtung. Dies ist vernachlässigbar.



a)



b)

Abbildung 8.25.: Toleranzen der Fertigung: a) Ineinander gepresste Laminierschichten; b) Verzoogene SUEx-Balken durch Fließen im Postbake

8.7 Rezeption der taktilen Informationsdarstellung und der adaptiven Fernbedienung

Zur Validierung des in den vorigen Kapiteln vorgestellten technischen Ansatzes führen die Projektpartner des Institut für Gerontologie an der TU Dortmund einen zweiten Nutzertest durch. Dies liefert eine Einschätzung des Gewinns an Bediensicherheit durch den Einsatz haptischer Icons, sowie der Akzeptanz und der Einsatzmöglichkeiten einer adaptiven Fernbedienung im häuslichen Kontext.

8.7.1 Konzeption des zweiten Nutzertests

In der Nutzerbefragung des ersten Probandentests nennen die Befragten die Haushaltsgeräte, die nur noch schwer bedient werden können, deren Bedienbarkeit für ein selbstbestimmtes Leben aber erhalten werden muss. In Abbildung 8.28 sind die Geräte aufgelistet. Dabei schätzen 87,8 % der Probanden eine Fernbedienung als Universalbediengerät als hilfreich ein. Allerdings handelt es sich bei der Gruppe der Befragten um technikaffine Menschen: 95,6 % nehmen neue Geräte gerne in ihren Alltag auf, so lange sie intuitiv bedienbar sind.

Die Validierung der haptischen Icons und der Fernbedienung wird daher am Beispiel der Waschmaschine durchgeführt. Der Test simuliert einen Bedienvorgang: Der Proband soll das Waschprogramm „Pflegeleicht, 40 °C“ auswählen und die Maschine starten. Hierfür werden starre Fernbedienungs-Demonstratoren eingesetzt. Die akustische Rückmeldung während der Bedienung erfolgt durch den Versuchsleiter, im Falle der haptischen Rückmeldung wird nach jedem Eingabeschritt ein neuer Demonstrator mit angepasstem Layout bereitgestellt.

Da die Probanden laut der ersten Nutzerbefragung mit der akustischen Rückmeldung durch Sprachausgabe vertraut sind, werden im zweiten Nutzertest eine vertraute und eine neue Bedienstrategie verglichen: Die Unterstützung der tastenbasierten Eingabe durch akustische und durch haptische Rückmeldung. Zusätzlich werden zwei unterschiedliche Symbolkonzepte evaluiert: Die Darstellung der von der Waschmaschine bekannten Symbole, z.B. für bestimmte Schleuderprogramme, als taktile Icons im Vergleich zu abstrakten, aber weniger komplexen Symbolen in Form

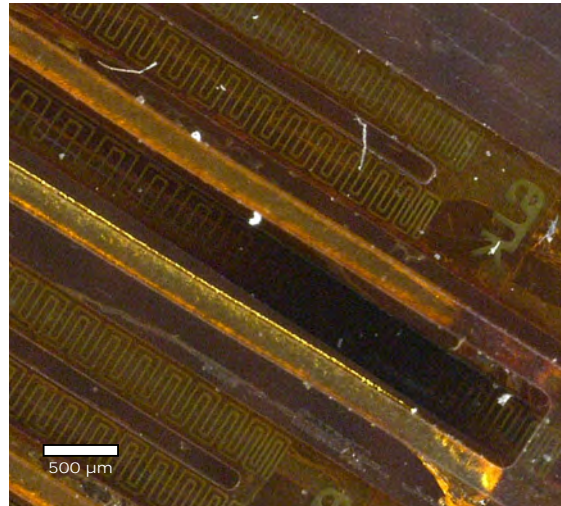


Abbildung 8.26.: Defekter Out-of-Plane Aktor: Verkohlen des Dehnungskörpers im vorderen Drittel durch nicht optimal angepassten Heizer

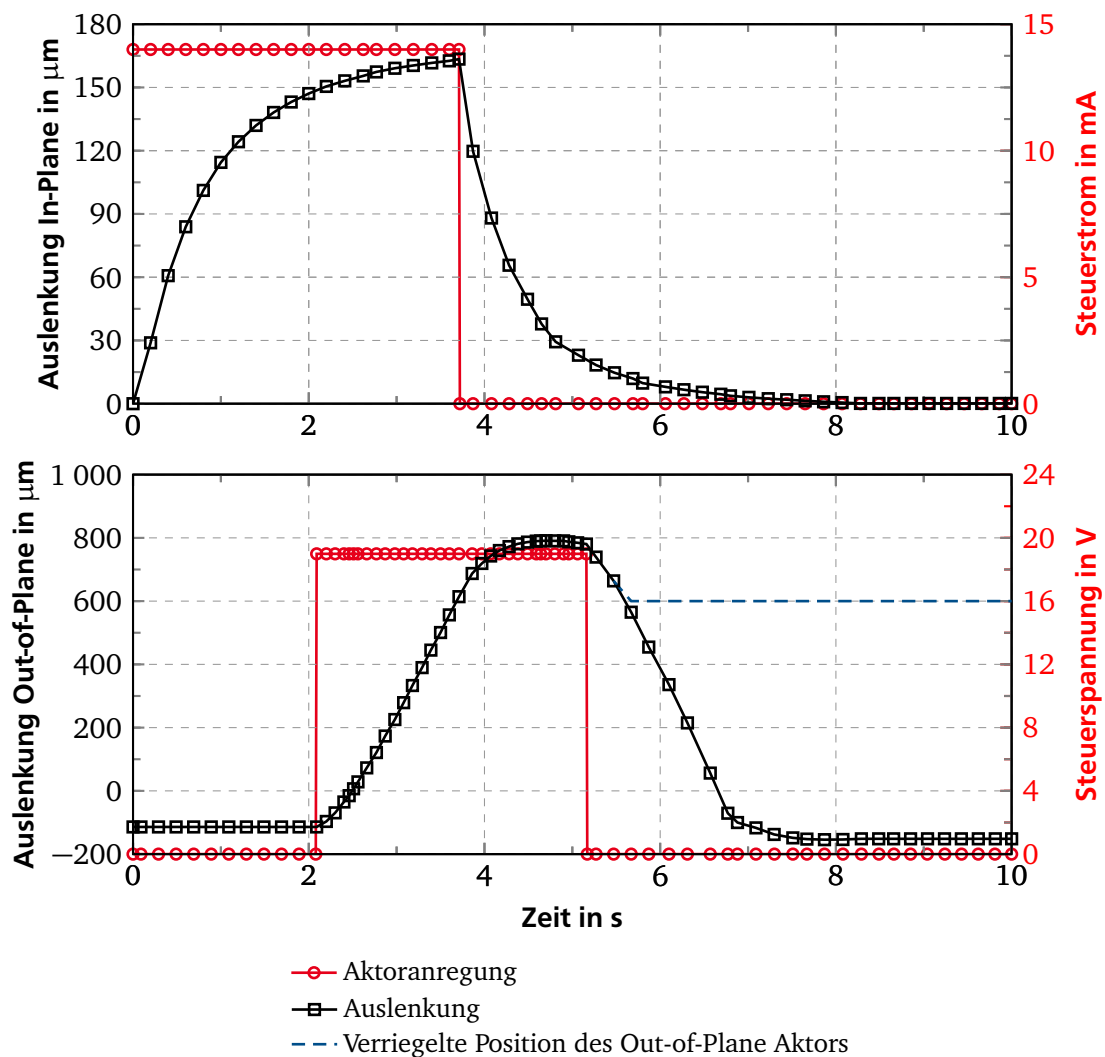


Abbildung 8.27.: Aus Sprungantworten zusammengesetzter Zeitverlauf eines Verriegelungsvorgangs mit den Steuerleistungen $P_{\text{IP}} = 110 \text{ mW}$ und $P_{\text{OoP}} = 290 \text{ mW}$; Die Schaltzeit beträgt 5,16 s bei einer Schaltenergie von 1,26 Ws

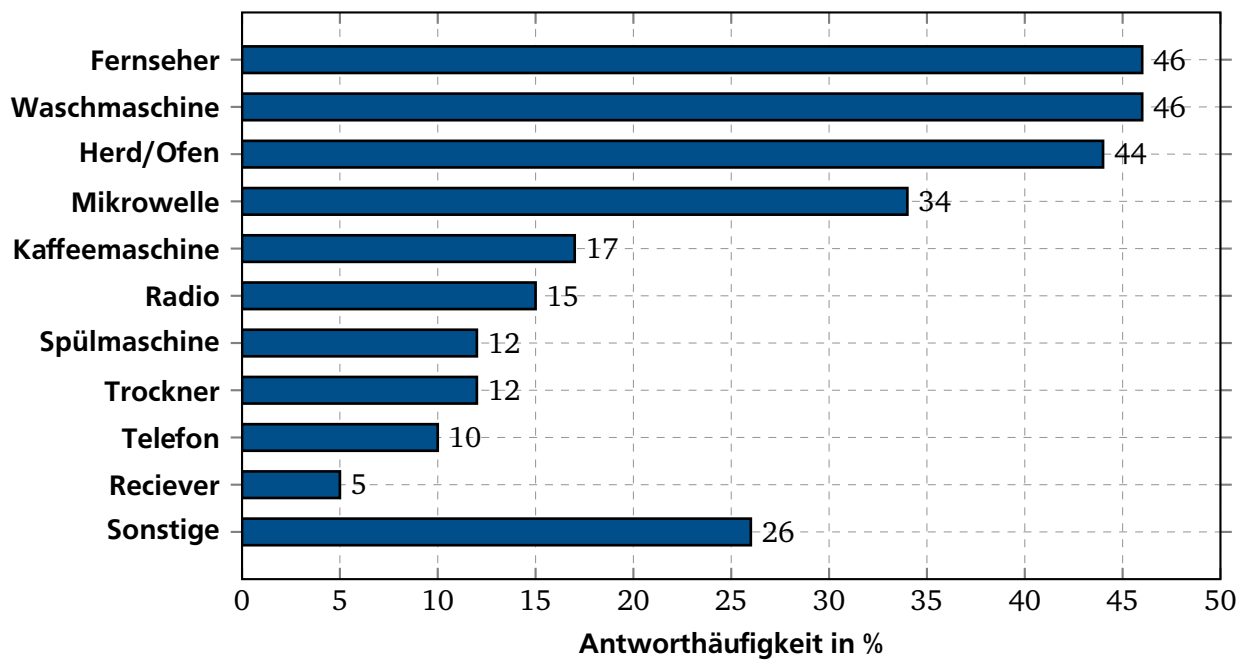


Abbildung 8.28.: Umfrage zu nicht mehr, oder schwer bedienbaren Haushaltsgeräten mit 40 Teilnehmern (Mehrfachnennungen möglich) nach [204]

von Buchstaben und Zahlen. Dabei ist die These, dass altersblinde Personen sich an visuelle Symbole erinnern und diese beim Ertasten wiedererkennen.

Die Gestaltung des akustischen Demonstrators orientiert sich an dem in der Zielgruppe etablierten Sprachnotizgerät Milestone der Bones AG und besteht aus einem Bedienkreuz, ähnlich einem MP3-Player, sowie vier zusätzlichen Tasten für „Abspielen“, „Stop“, „Zurück“ und „An/Aus“. Abbildung 8.29 zeigt diesen Demonstrator.

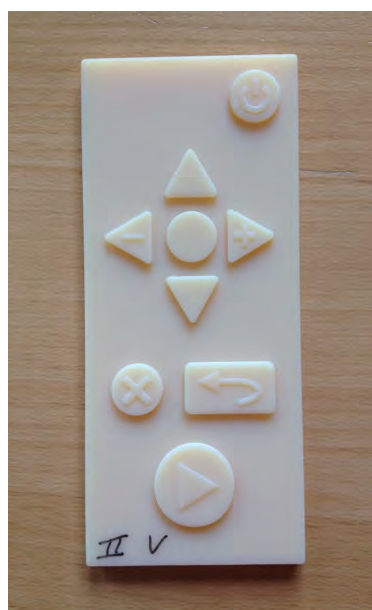


Abbildung 8.29.: Demonstrator zur Waschmaschinenbedienung mit akustischer Rückmeldung

Für die taktile Rückmeldung werden vier im Quadrat angeordnete Tasten mit haptischen Icons versehen. Die Symbole haben eine Linienhöhe von 0,5 mm, eine Linienbreite von 1 mm und nehmen eine Fläche von 21 x 21 mm² ein. Um den aktuellen Auswahlstatus nachzuvollziehen, ist im oberen Drittel der Fernbedienung ein Anzeigefeld vorgesehen, wo die zuvor auf den Tasten vorhandenen Symbole im Uhrzeigersinn nach erfolgter Eingabe angezeigt werden. So kann in jeder Menüebene die Historie des Auswahlvorgangs nachvollzogen werden. Abbildung 8.30a) zeigt die haptischen Demonstratoren mit Symbolen, Abbildung 8.30b) zeigt die Demonstratoren mit Buchstaben.

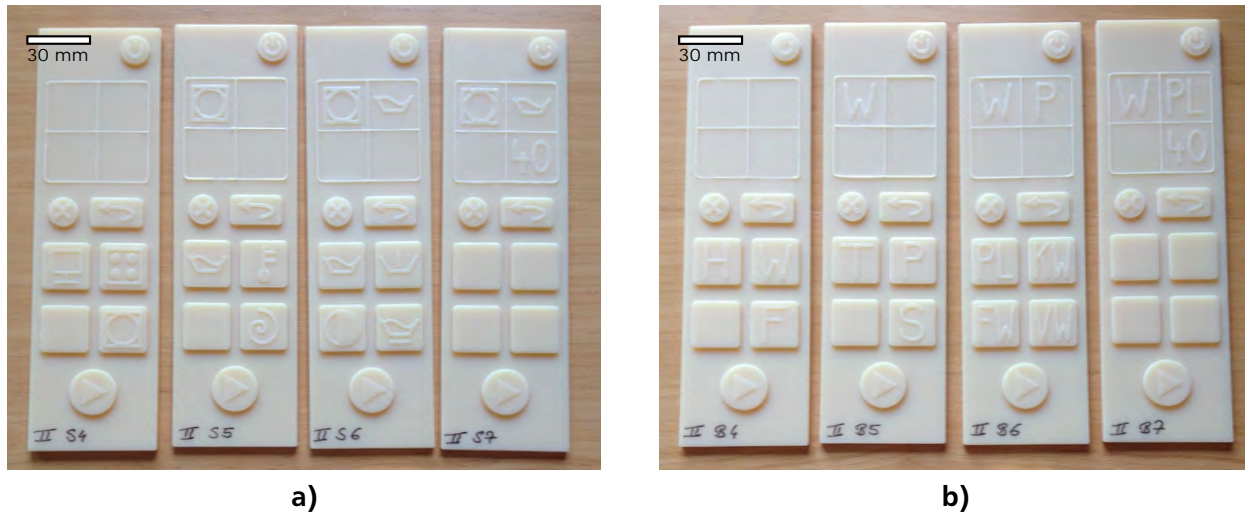


Abbildung 8.30.: Demonstratoren zur Waschmaschinenbedienung mit haptischer Rückmeldung: a) Icons nach bekannten Haushaltsgeräten und Waschsymbolen; b) Abstrakte Icons aus Buchstaben und Zahlen

Die Demonstratoren werden mittels 3D-Druck hergestellt. Die einheitliche Färbung der Demonstratoren und die daraus folgende schlechte Erkennbarkeit der Icons hilft, den Störfaktor „Restsehfähigkeit“ der Probanden zu minimieren.

8.7.2 Ergebnis der simulierten Gerätebedienung

Der Nutzertest wird mit 34 Personen durchgeführt. Neben der Evaluierung der Bedienkonzepte wird eine Befragung der Probanden durchgeführt.

Akustisches Bedienkonzept

Der Aufbau der dafür angefertigten Fernbedienung wird als gut und übersichtlich bewertet. Die Tasten sind gut fühlbar. Die haptischen Zeichen zur Beschriftung der Tasten werden zum Teil als schwer erkennbar eingestuft, sind aber durch die prägnante Position und Form der einzelnen Tasten nicht notwendig. Trotz unterschiedlicher Vorlieben hinsichtlich der Tastengröße, werden die Tasten zu 70 % von den Probanden erkannt. Die Menüführung über Sprachausgabe ist dem überwiegenden Teil der Personen durch andere sprachgesteuerte Geräte vertraut. Sie erscheint leicht verständlich und logisch aufgebaut.

Haptisches Bedienkonzept

Es zeigt sich deutlich, dass die Erkennungsrate der Symbole mit ihrer Komplexität deutlich zurück geht. Die in Abbildung 8.30a) links auf den Tasten angebrachten Icons „Fernseher“ (zu 87 %

erkannt), Herd (zu 47 % erkannt) und Waschmaschine (zu 100 % erkannt) unterscheiden sich bereits deutlich. Je spezieller die Symbole sind, bspw. die verschiedenen Waschgänge in Abbildung 8.30a), desto geringer wird die Erkennungsrate. Der Test zeigt weiterhin, dass die Probanden mit den ertasteten Icons keine visuell bekannten Bilder assoziieren. Damit muss jedes Symbol neu erlernt werden, was gerade bei den komplexen Symbolen eine hohe kognitive Belastung darstellt. Daher sollte in zukünftigen Arbeiten der Fokus auf klare Symbole, wie Kreise, Rechtecke oder Pfeile gelegt werden.

Einfache Buchstaben können mit einer Erkennungsrate von durchschnittlich 80 % gut erkannt werden und schneiden damit besser ab, als die Symbole. Der Transfer einer Funktion auf den zugehörigen Buchstaben (z.B. „Waschmaschine auswählen“ auf Buchstabe „W“) ist jedoch nur bei einfachen oder häufig benutzten Funktionen intuitiv. Außerdem muss bei einer hohen Zahl von Gerätefunktionen mindestens auf Buchstabenpaare zurückgegriffen werden, was den Komplexitätsgrad wieder erhöht und ebenfalls eine hohe kognitive Belastung darstellt.

Die Symbolanzeige im oberen Drittel der Fernbedienungs-Demonstratoren wird als positiv eingestuft, da die Orientierung in der Bedienhistorie jederzeit gewährleistet ist, und die Zeit des Neu-Vorlesens bei akustischer Rückmeldung eingespart wird.

8.7.3 Designrichtlinien für die Fernbedienung

Aus den Ergebnissen des Nutzertests lassen sich zusammenfassend folgende Designrichtlinien für die Gestaltung der Fernbedienung ableiten:

- Aufbau der Fernbedienung
 - Verzicht auf taktile Oberflächeninformationen auf den Tasten
 - Einsatz weniger Tasten, deren Funktion durch die Verwendung einfacher Icons (siehe Abbildung 8.5) unterscheidbar ist
 - Eingabe von Zahlen über einen Ziffernblock mit taktil markierter Taste fünf
 - Kontraststreiche, ggf. beleuchtete Zeichen/Tasten, damit auch Menschen mit Restsehen diese nutzen können
 - Bauraum: 140 x 60 x 15 mm³
 - Einkerbung auf der Fernbedienungsrückseite, um eine reproduzierbare Griffposition zu erreichen
 - Gewicht <100 g
 - Tasten: Hub = 2 mm; Abstand = 6 mm
- Menüführung
 - Ggf. frei programmierbare Oberfläche entsprechend der eigenen Bedürfnisse (ggf. mit Einrichtungsmodus über PC)
 - Freie Belegung von Tasten mit favorisierten Funktionen
 - Integration einer Sprachausgabe
 - Möglichkeit zur Spracheingabe
 - Akustisches oder vibrotaktil Feedback bei Tastendruck
 - Statusmeldung für Batteriestand

-
- Alarmmeldung bei Fehlfunktion des Endgerätes
 - Möglichkeit zum Auffinden der Fernbedienung
 - Sonstiges
 - Für Sprachausgabe angenehme Stimme wählen, wenn möglich Auswahl bieten
 - Feuchtigkeitsresistenz der Fernbedienung
 - Abwischbare Oberfläche
 - Angenehm zu betastendes Material, z.B. Silikonschaltmatte
 - Ladeschale oder lange Haltbarkeit bei Batteriebetrieb
 - Kopfhörerbuchse
 - Kosten: 50-200 €
 - Leicht verständliche Sprachanleitung für Einarbeitung in Bedienung
 - Endgeräte müssen auch aus ungünstigem Winkel auf FB ansprechen

8.8 Fazit

Die Ergebnisse der Anwendung elektrothermischer Mikroaktoren in einem haptischen Display für eine Fernbedienung zur Gerätebedienung im Haushalt lassen sich wie folgt zusammenfassen.

8.8.1 Haptisches Display mit integrierten Antrieben

Kapitel 8.6 zeigt, dass sich das neuartige haptische Display fertigen lässt und die notwendige Leistungsfähigkeit aufweist. Tabelle 8.6 stellt die Anforderungen aus Tabelle 8.3 den Kenndaten des Displays gegenüber. Abgesehen von der Maximaltemperatur des Out-of-Plane Aktors sind die Anforderungen erfüllt. Durch Anpassung der Aktorauslegung ist eine deutliche Reduzierung der Betriebstemperatur möglich.

Die Zielgruppe der älteren Menschen steht dem Einsatz von haptischen Icons in der hier gestalteten Form sehr zurückhaltend gegenüber. Die hohe Zahl an Optionen bei der Bedienung moderner Geräte erfordert komplexe Icons, und damit eine zu hohe Lernleistung. Wenige einfache und große Symbole oder Buchstaben weisen eine hohe Erkennungsrate auf und können bei der Gerätebedienung unterstützend wirken. Wie die Versuche mit der akustischen Rückmeldung zeigen, überwiegt jedoch die Erinnerung an die Position und Form ganzer Tasten und nicht ihre Kennzeichnung durch taktile Icons.

Der Einsatz eines haptischen Rückmeldefeldes zur schnellen Prüfung der Eingabehistorie oder zur Vermeidung einer Stigmatisierung durch öffentliche akustische Unterstützung wird als sinnvoll eingestuft. Die Erforschung eines großflächigen Displays zur Informationsdarstellung als Rückmeldefeld ist auch für eine Fernbedienung als Universalbediengerät sinnvoll. Für das BMBF-geförderte Verbundprojekt Mobilize, in dem dieser Ansatz am Institut EMK verfolgt wird, ergibt sich somit ein neues Anwendungsgebiet.

Tabelle 8.6.: Vergleich von Anforderungen und Kenndaten des haptischen Displays

Anforderung	Einheit	Soll	Ist
Taxel-Grundform	–	quadratisch	quadratisch
Taxel-Abstand	mm	2,5	2,5
Taxel-Höhe	mm	0,5	0,5
Kraft des Nutzers auf statisches Taxel	mN	200	200
Array-Größe	–	6x6 Taxel	6x6 Taxel
Maximale Bauhöhe	mm	23	15
Antriebsprinzip	–	elektrothermisch	elektrothermisch
Verriegelung der Taxel	–	mechanisch bistabil	mechanisch bistabil
Schaltenergie	Ws	möglichst gering	1,26
Schaltzeit	s	möglichst gering	5,16
Technologie		OMM	OMM, Mikrofräsen, 3D-Druck 3D-Druck
Dicke der Polymerschichten	µm	300	300
Maximale Aktortemperatur	°C	120	175
Umgebungstemperatur	°C	21	21

8.8.2 Adaptive Fernbedienung

Die Applikation einer Fernbedienung als universales Bediengerät im Haushalt wird von der weiten Mehrheit der Probanden als hilfreich eingestuft. Die lange Liste an Haushaltsgeräten, deren Bedienung mit dem Alter eingeschränkt wird, unterstreicht den Bedarf für eine Lösung. Dabei kann die Fernbedienung eine kostengünstige oder funktionsfokussierte Alternative zum Smartphone bieten. Hierfür stehen jetzt Designrichtlinien zur Verfügung.

Als weitere Einsatzszenarien ist denkbar:

- Medizinische Versorgung: selbständig bedienbare Blutdruckmess-/ Diabetesgeräte (Insulinpumpen)
- Arbeitsleben: Bedienung von Fotokopierern, Faxgeräten
- Mobilität: Hilfen zur Nutzung öffentlicher Verkehrsmittel, Erhöhung der Barrierefreiheit (z.B. Grünerkennung an Ampeln/ Öffnen elektrischer Türen), Gefahrenerkennung, Navigation



9 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Leistungssteigerung miniaturisierter elektrothermischer Polymeraktoren untersucht. Hierfür werden zunächst die Zusammenhänge zwischen den Prozessparametern und den Eigenschaften der Konstruktionswerkstoffe SU-8 und galvanisch abgeschiedenes Nickel untersucht. Die Kenntnis der Abhängigkeiten ermöglicht eine gezielte Einstellung der Eigenschaften, bspw. eine verbesserte Temperaturbelastbarkeit oder einen erhöhten spezifischen Widerstand. Die dabei ermittelten mechanischen Eigenschaften der Werkstoffe und ihre Temperaturabhängigkeiten fließen in ein neuartiges gekoppeltes FEM-Modell ein. Dies erlaubt die lokale Anpassung des Temperaturfelds im Mikroaktor durch ein geometrieabhängiges Heizerlayout. So wird die Maximaltemperatur des Werkstoffs auf möglichst weiten Bereichen der geheizten Strukturabschnitte erreicht. Die messtechnische Charakterisierung dieser hinsichtlich der Werkstoffe und der Temperaturverteilung verbesserten Aktoren ergibt eine Steigerung der Auslenkung von 20...30 % im Vergleich zu den Aktoren zu Beginn der Arbeit.

Abschließend wird ein neuartiges tragbares haptisches Display für Fernbedienungen im Hinblick auf den demographischen Wandel erforscht. Es besteht aus einem Array taktiler Bildpunkte (Taxel), die um eine feste Höhenstufe aus der Tastenfläche angehoben werden, um dem Benutzer haptische Icons darzustellen. Ein neuartiges mechanisch bistabiles Antriebskonzept mit optimierten elektrothermischen In-Plane- und Out-of-Plane-Aktoren erlaubt den energieeffizienten Antrieb jedes einzelnen Taxels. Das Display wird erfolgreich aufgebaut und charakterisiert.

9.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

Im Folgenden sind die wesentlichen Antworten der vorliegenden Arbeit auf die zu Beginn gestellten wissenschaftlichen Fragestellungen zusammengefasst.

- Optimierung der Werkstoffeigenschaften und Quantifizierung der Einsatzgrenzen von SU-8

Zu den Eigenschaften von SU-8 wurden zahlreiche Versuche durchgeführt. Dabei haben sich die Maximaltemperaturen von Post- und Hardbake als kritische Faktoren für die Vernetzung und die Glas temperatur, und damit die thermomechanisch-zyklische Beanspruchung herausgestellt. Beide Parameter sind so hoch wie möglich zu wählen, die Postbaketemperatur schränkt jedoch die Strukturauflösung ein und sollte 95 °C nicht überschreiten. Die Glas temperatur hat sich als guter Kennwert zur Abschätzung der Materialeignung für die Mikroaktoren herausgestellt. Mit dem vorliegenden Fertigungsprozess wird eine Glas temperatur von 135 °C erreicht. Die Temperaturabhängigkeit des Elastizitätsmoduls wurde bestimmt und ist als Grundlage zur Aktormodellierung nutzbar. Die intrinsischen Spannungen ergeben sich abhängig von der Herstellung zu 3...11 MPa.

- Optimierung der Werkstoffeigenschaften von galvanisch abgeschiedenem Nickel

Auch für galvanisches Nickel wurde die Abhängigkeit der Werkstoffeigenschaften von den Prozessparametern ermittelt. Mit dem verwendeten Nickelsulfamatbad lassen sich spannungsarme Strukturen mit einem E-Modul von 150 GPa fertigen. Der spezifische Widerstand konnte im Bereich 0,065...0,078 $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$ eingestellt werden. Maßgeblichen Einfluss haben vor allem die Parameter Stromdichte, Pulse-Plating und Substratmaterial. Der Temperaturkoeffizient des Widerstands ergibt sich zu $5,93 \cdot 10^{-3} \text{K}^{-1}$. Die zyklische mechanische Belastung und der daraus folgende Ermüdungsbruch der Nickel-Leiterbahnen limitieren die Lebensdauer der Aktoren. Durch Reduzieren des Leiterbahnquerschnitts von 50 μm auf 20 μm und

Einsatz einer kerbspannungsreduzierten Heizergeometrie konnte eine deutliche Steigerung der Lebensdauer erzielt werden. Damit erweist sich Nickel weiterhin als geeigneter Werkstoff für die Mikroaktoren.

- Steigerung der Leistungsfähigkeit indirekt geheizter Polymeraktoren

Für die Aktoroptimierung und den Entwurf wurde ein neues gekoppeltes FEM-Modell erarbeitet. Die vollständige Aktorgeometrie mit Luftspalten, Substrat und Heizer kann dort modelliert werden. In die Parametrisierung fließen die zuvor bestimmten Materialeigenschaften ein, besonders der temperaturabhängige Elastizitätsmodul von SU-8. Die thermischen Verluste sind über eine Konvektionsrandbedingung abgebildet, der zugehörige Koeffizient wurde in eigenen Versuchen zu $40 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ bestimmt. Daraus ergibt sich eine sehr gute Übereinstimmung zwischen vermessenen Aktoren und Simulation von $\pm 4\%$ in allen Domänen. Mit diesem Modell wird die Methode zur Optimierung der Temperaturverteilung erarbeitet und am Beispiel eines Referenzaktors gezeigt. Die simulierte Leistungssteigerung beträgt 17 %. Diese Methode minimiert den Temperaturabfall am Rand eines geheizten Balkens hin zu den unbeheizten Bereichen. Mit der Länge der Struktur nimmt also der prozentuale Nutzen der vorgestellten Methode ab. Bis zu einem Verhältnis Länge:Breite von 10:1 konnte aber eine deutliche Verbesserung der Temperaturverteilung gezeigt werden.

- Charakterisierung unidirektional betriebener verbesserter Mikroaktoren

Das Verhalten der Aktoren mit verbesserten Materialien und optimiertem Heizer wurde in statischen, dynamischen und Langzeituntersuchungen bestimmt. Die bereits zu Beginn der Arbeit bekannte Nulllagenverschiebung tritt weiterhin mit bis zu 25 % des Aktorhubs auf, bleibt aber auch für lange Betriebszeiten konstant. Sie kann daher durch Überdimensionierung der Aktoren ausgeglichen werden. Die erreichbare Anzahl Aktorzyklen sinkt mit ansteigender Steuerleistung: Bei 150 mW werden >45.000 Zyklen, bei 315 mW ca. 900 Zyklen erreicht. Ausfallgrund ist der Ermüdungsbruch des Heizers. Ab einer Leistung von ca. 350 mW werden die Aktoren thermisch zerstört. Die Aktoren erweisen sich auch für Betriebstemperaturen oberhalb der für SU-8 bestimmten Grenze als stabil funktionsfähig. Grund hierfür ist die Eigenschaft des Werkstoffs, thermisch nachzuvernetzen, was bei langem Betrieb der Aktoren bei hoher Temperatur zu erwarten ist. Die Glastemperatur eignet sich weiterhin als Betriebsgrenze, jedoch sind weitere Versuche besonders mit nicht thermisch vernetzenden Materialien notwendig.

9.2 Ausblick

Im Laufe der Arbeit haben sich zahlreiche weiterführende Fragestellungen eröffnet. Im Folgenden wird ein Ausblick auf die direkte Weiterführung der erzielten Ergebnisse, darüber hinausgehende Forschungsfragen, sowie eine Reihe neuartiger Applikationen für elektrothermische Polymeraktoren vorgestellt. Einige dieser weiterführenden Themen befinden sich mittlerweile in Bearbeitung oder sind in Projektanträge eingeflossen.

9.2.1 Weiterführung der vorliegenden Arbeit

Die in der vorliegenden Arbeit erzielten Ergebnisse zu den Mikroaktoren lassen sich hinsichtlich der Fertigungstechnologien, der Leistungsfähigkeit der Mikroaktoren und ihrer Anwendung in der adaptiven Fernbedienung weiterführen.

Technologie und Aktormaterialien

Derzeit wird die Aktorlebensdauer durch die Ermüdung des galvanisch abgeformten Heizers begrenzt. Hier sind weitere Versuche zur Verbesserung der Biegeweichfähigkeit der galvanischen Schichten nötig. Alternativ können Dünnschichtheizer eingesetzt werden, hier ist aber eine weitere Technologieentwicklung hin zu Strukturen mit 20 μm Breite sinnvoll.

Weiterhin schränkt das kostengünstige und weit verbreitete Substratmaterial FR-4 die Hardbaketemperatur auf 180 °C ein. SU-8 verbessert seine thermomechanischen Eigenschaften bis hin zu 238 °C. Als alternative, jedoch teurere Substratmaterialien kommen glasgewebeverstärkte Polyimid-Materialien wie Arlon 35N oder Isola P95/25 in Frage, die für den Dauereinsatz bis 200 °C konzipiert sind. Ebenfalls in Frage kommen Teflon-basierte Materialien.

Als kritischer Parameter für die Aktordynamik hat sich die Schichtdicke des Dehnungskörpers herausgestellt. Ein verbesserter Gießprozess zur besseren Kontrolle hat sich zum Ende der Arbeit als wünschenswert herausgestellt. Eine Steigerung der Dynamik ist durch den Einsatz dünnerer Schichten möglich.

Die Fertigung der zweilagigen Aktoren im Substratverbund erweist sich als schwierig, da sich die langen Balkenstrukturen im Postbake verziehen. Hier bieten sich zwei Optimierungsmöglichkeiten an: Wird die unterliegende SU-8-Schicht nicht entwickelt, kann sich die obere Lage abstützen und es entstehen keine Hohlräume, in denen sich flüssiger Photoresist sammeln kann. Alternativ kann, wie in der Arbeit von *el Khoury* auf ein Substrat verzichtet werden, dann wird jedoch eine robuste Lösung für das mechanische und das elektrische Ankoppeln der Aktoren nötig.

Aktorcharakterisierung

Die Langzeitbeständigkeit der Mikroaktoren ist derzeit nur für die Leerlaufauslenkung ohne äußere Kraft untersucht. In der Vorgängerarbeit von *Staab* wurde ein bidirektionales Antriebskonzept gewählt, bei dem sich Verformungen durch die Aktorlast kompensieren. Da bereits im Leerlauf große plastische Verformungen auftreten, ist die Charakterisierung des Aktorverhaltens unter Last sehr wichtig, um die Grenzen des unidirektionalen Betriebs aufzuzeigen. Derzeit ist keine automatisierte Messtechnik für einen Dauertest vorhanden.

Modellbildung

Die Charakterisierung des Out-of-Plane-Aktors hat gezeigt, dass der sich während der Aktorbewegung ändernde Luftspalt zu einem Überschwingen der Aktoren und zu einer Veränderung der Temperaturverteilung führt. Das derzeitige FEM-Modell bildet dieses Verhalten nicht ab, da die mechanische Verformung der Geometrie nicht mit der elektrothermischen Simulation gekoppelt ist. Daher kann auch kein optimierter Heizer ausgelegt werden. Sollen auch in Zukunft substratgebundene Out-of-Plane-Aktoren erforscht werden, ist eine Erweiterung des bestehenden Modells nötig.

Weiterhin hat die Untersuchung des dynamischen Aktorverhaltens gezeigt, dass sich die Ansprechzeit der Aktoren abhängig von Strom- oder Spannungsspeisung unterscheidet. Grund ist die vergleichsweise hohe thermische Zeitkonstante der Aktorgeometrie und damit das träge Erwärmen des Widerstandsheizers. Im Falle einer analytischen Modellbildung, bspw. durch ein thermisches Netzwerk, ist zu beachten, dass der eingeprägte Wärmestrom der elektrischen Wärmeleistung entspricht und die treibende elektrische Größe dort quadratisch eingeht.

Haptisches Display und Fernbedienung

Die geringe Dynamik der elektrothermischen Aktoren erweist sich für Consumer-Produkte als kritisch. Im Falle des haptischen Displays sind die Kräfte während des Schaltens nicht von Belang. Daher können geringere Aktorschichtdicken zur Steigerung der Dynamik verwendet werden.

Zur Reduzierung des Bauraums bietet sich die Wahl eines dünneren Substratmaterials an. Das Substrat muss das Mikrosystem tragen und Nutzerkräfte von 200 mN aufnehmen.

Die große Lernleistung zur Unterscheidung haptischer Icons war ein entscheidender Kritikpunkt der hier erforschten Applikation. Um die Grenzen von Formgebung, Komplexität oder Variantenanzahl der Icons zu bestimmen, können weitere Nutzertests ohne spezifischen Applikationsbezug und die damit verbundenen Erwartungen der Probanden durchgeführt werden. Damit lässt sich eine bessere Grundlage zur Gestaltung haptischer Icons schaffen.

9.2.2 Weitere Forschungsfragen: Alternative Aktormaterialien

Die Werkstoffe von Dehnungskörper und Heizer und ihre Verarbeitung sind entscheidend für die Leistungsfähigkeit und Langlebigkeit der Aktoren. Im Hinblick auf die industrielle Nutzbarkeit kommen die Kompatibilität zu bestehender Technologie und Kosten hinzu.

Polymere Folienmaterialien, bspw. der hochtemperaturfeste Werkstoff PEEK, oder flexible Leiterplatten auf Polyimidbasis, werden bei Leiterplattenherstellern eingesetzt. Die Abschlussarbeit von *Islam* zeigt, dass Aktoren aus dem Folienmaterialien auch mit mehreren Lagen fertigbar sind [243]. Auch steht 3D-Druck mittlerweile für 3D-strukturierbare Polymerkörper mit völlig neuem Gestaltungsfreiraum zur Verfügung. Auch so genannte Hybridpolymere, die einen Glasübergang jenseits von 200 °C aufweisen, kommen trotz hoher Materialkosten in Frage.

Die vorliegende Arbeit zeigt eine Vorgehensweise zur Charakterisierung der Aktormaterialien auf und stellt Bezugswertkennwerte für SU-8 zur Verfügung. Dies kann als Vorlage für eine systematische Material- und Aktorcharakterisierung dienen.

9.2.3 Neue Applikationen

Im Laufe der Erforschung elektrothermischer Polymeraktoren und ihrer Eigenschaften bieten sich zahlreiche neuartige Anwendungen an, auf die im Folgenden eingegangen wird.

Normal-geschlossener Linearschrittantrieb für ein integriertes Dosiersystem

Miniaturisierte Systeme zur Medikamentendosierung werden seit vielen Jahren erforscht, auf Waferebene integrierte, kompakte Fluidik- und Aktorsysteme sind jedoch kaum verfügbar. An dieser Stelle kann ein normal-geschlossener elektrothermisch aktuierter Linearschrittantrieb aus SU-8 abhelfen. Kapitel 4.5.4 zeigt den gezielten Einsatz unterschiedlich prozessierter SU-8-Schichten zur Herstellung intrinsisch vorgespannter Strukturen. Dies wird für einen normal-geschlossenen Linearschrittantrieb angewendet. Abbildung 9.1a) zeigt das Funktionsprinzip: Einseitig befestigte Kniehebelgetriebe mit gezahnten Klemmen an der Spitze dienen sowohl zum Halten des Läufers durch intrinsisch vorgespannte Klemmen, als auch zum Vorschub. Im vorderen Schenkel des Kniehebelgetriebes sitzt ein Pseudobimorph-Aktor, der durch unterschiedliche Schichtspannungen in den Balken in Richtung Läufer vorgespannt ist und Aktuierung die Klemme öffnet. Dabei werden die Ergebnisse von Kapitel 4.5.4 genutzt: Durch unterschiedliche Prozessierung zweier SU-8-Schichten wird ein Gradient intrinsischer Spannungen in den Pseudobimorph-Aktor eingebracht,

die Struktur verwindet sich und schließt die Klemmen. Die Vorwärtsbewegung des Antriebs erzeugt ein temperaturkompensiert aufgehängter Kniehebel-Aktor, der das Knie des Getriebes durchdrückt. Die Vorarbeiten zur Realisierung des Antriebs sind abgeschlossen: Abbildung 9.1b) zeigt ein erstes Labormuster, das auf der Konferenz Actuator 2012 vorgestellt wurde [218]. Ein analytisches Modell zur Auslegung der Aktorkinematik wurde in der Bachelorarbeit von *Schlemmer* erarbeitet [244].

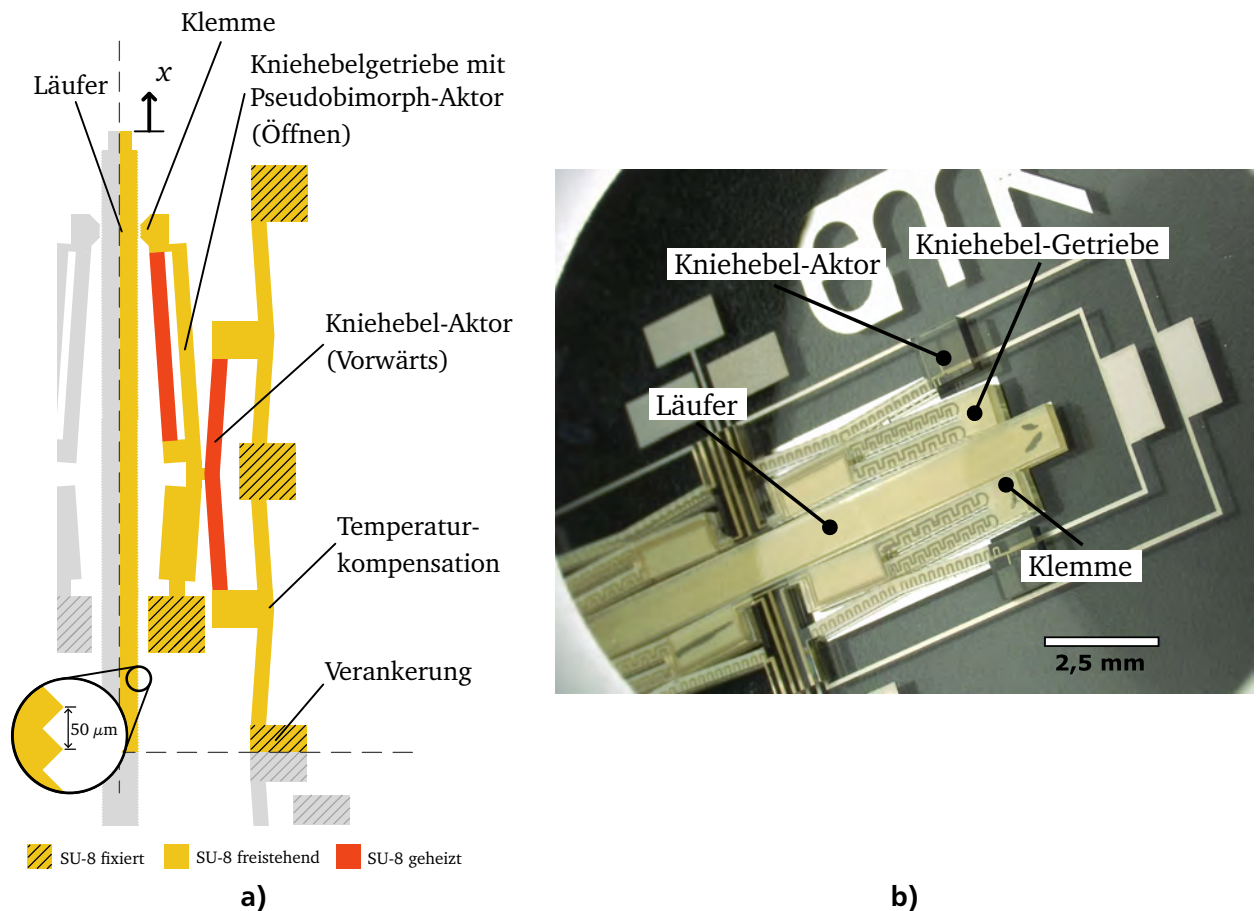


Abbildung 9.1.: Normal-geschlossener Linearschrittantrieb mit intrinsisch vorgespannter Klemmung: a) Funktionsprinzip; b) Aufgebautes Funktionsmuster, veröffentlicht in [218]

Funktionsintegrierte Smart-Targets für Lasereperimente

Zur Erforschung von Materie im Plasmazustand werden metallische Hohlproben im Hochvakuum durch Hochenergielaser in definierte Teilchenpulse gewandelt. Derzeit findet ca. ein Experiment pro Stunde statt, in naher Zukunft sollen Repetitionsraten bis zu 10 Hz möglich sein. Den begrenzenden Faktor stellt die Justage der Proben im Fokus des Lasers dar. Hier können die elektrothermischen Polymeraktoren und die Mikrotechnik abhelfen:

Ein Smart-Target, bestehend aus monolithisch gefertigter Probe und Halter, ersetzt die bisherigen Aufbauten. Der Probenhalter wird elektrothermisch aktuiert und dient als integriertes Justagesystem. Dies macht die derzeitigen Aufbauten mit feinwerktechnischen Justagesystemen und händisch gefügter Probe unnötig. Dank der kostengünstigen Fertigung und des geringen Materialeinsatzes wird das Smart-Target als Einmal-Produkt konzipiert. Der kleine Bauraum ermöglicht

eine Anordnung der Systeme im Array, was nach jeder Evakuierung Mehrfachschüsse möglich macht. Abbildung 9.2 zeigt die Konzeptskizze.

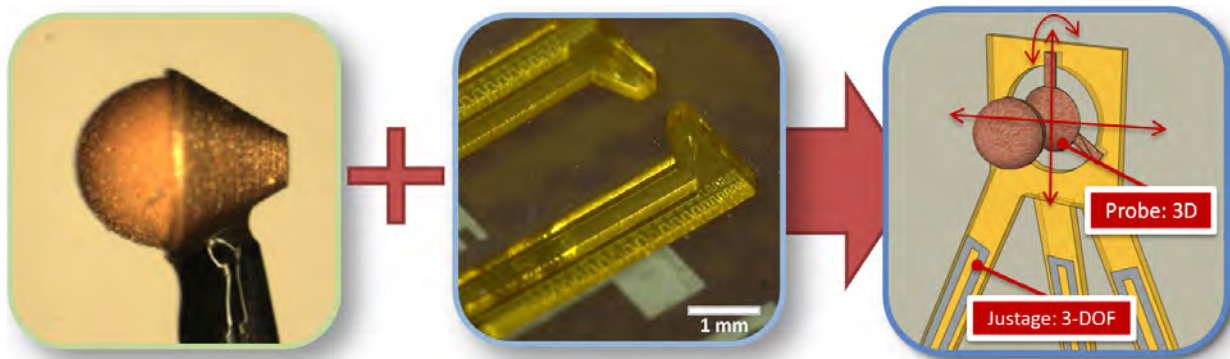


Abbildung 9.2.: Konzeptskizze eines integrierten Smart-Targets, bestehend aus einer monolithisch gefertigten Probe für Laserexperimente und Probenhalter mit aktiver Justierfunktion

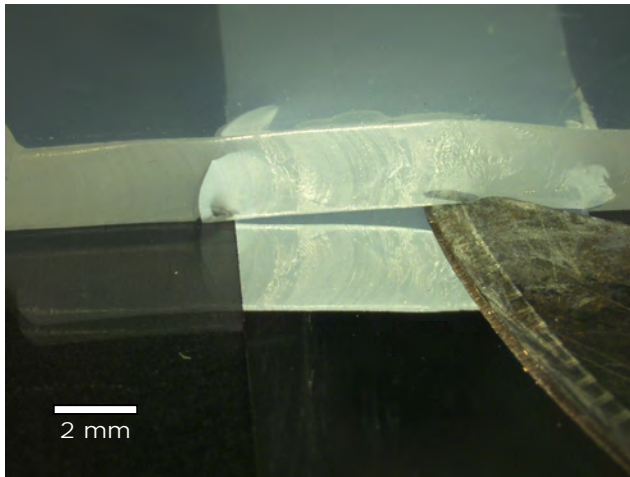
Mikroventil

Der Einsatz von Out-of-Plane-Aktoren erlaubt den Aufbau miniaturisierter Ventile. Dabei sind normal-geschlossene oder normal-offene Konzepte denkbar, aufgrund der Ergebnisse dieser Arbeit erscheint ein normal-geschlossenes System aussichtsreicher.

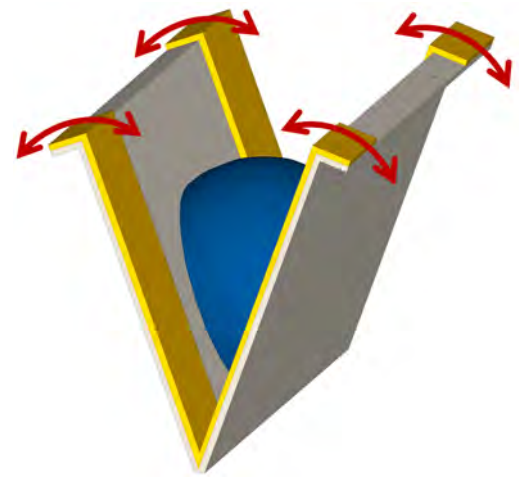
Zum dauerhaften Verschluss ist eine permanente Kraft auf den Ventilsitz nötig, der Aktor muss daher mechanisch vorgespannt werden. Dies kann durch einen Fügenschritt oder, bspw. beim Einsatz von SU-8, durch das gezielte Einbringen intrinsischer Spannungen erfolgen. Die in dieser Arbeit charakterisierte Nulllagenverschiebung der Aktoren verstärkt die Vorspannung, da der Aktor entgegen seiner öffnenden Betriebsrichtung einläuft. Das Öffnen des Ventils ist dennoch sichergestellt, da die Auslenkung der Aktoren in Bewegungsrichtung überwiegt. Die Konstruktion des Ventils als normal-offene Variante ist ebenfalls prinzipiell möglich. Hierfür müssen die Aktoren jedoch auf ihr Langzeitverhalten beim Ausüben von Kräften untersucht werden.

Zur Medientrennung und zur Abdichtung des Ventilsitzes kann ein Kanal aus Silikon genutzt werden. Hier sind zwei Bauformen möglich: Zum einen kann ein Kanal frei wählbarem Querschnitt durch eine Silikonschicht abgedeckt werden. Ein Aktor wird mit einem entsprechenden Verschlussenteil versehen und verschließt den Kanal. Durch Fügespalte oder Justagetoleranzen können hier deutliche Leckraten auftreten. Alternativ ist der Einsatz des Sauerstoffbondens zur Herstellung des Kanals möglich: Ein Sauerstoffplasma aktiviert die Oberflächen sauerstoffhaltiger Fügepartner, wie bspw. Glassubstrat und Silikonfolie. Durch Fügen direkt nach der Aktivierung entsteht eine stoffschlüssige Verbindung. Abbildung 9.3 zeigt das Ergebnis eines Vorversuchs, bei dem ein Aluminiumstreifen als Passivierung der Bondverbindung dient. So entsteht ein Fluidkanal ohne eigenen Querschnitt im druckfreien Zustand. Erst eine von außen aufgebrachte Druckdifferenz bewirkt das Aufwölben der Silikonfolie und das Entstehen eines Kanals. In Kombination mit einem OoP-Kniehebelaktor (siehe auch Kapitel 2.1.1) kann ein Mikroventil mit sehr niedriger Leckrate entwickelt werden.

Eine erste Untersuchung elektrothermischer Polymeraktoren für miniaturisierte Ventile findet sich in der Arbeit von Hummel [238].



a)



b)

Abbildung 9.3.: Neue Mikrosysteme: a) Normal-geschlossener querschnittsfreier Fluidkanal für Mikroventile: PDMS-Folie, gebondet auf Glas mit einer Passivierung aus Aluminium; b) Konzeptskizze für die kontinuierliche zyklische Bewegung von Zellen: Papierträger mit zellhaltigem Hydrogel (blau) und OoP-Bimorph-Aktoren (gelb)

Kostengünstige Aktuierung von Zellprobenträgern aus Papier

Zur weiteren Erforschung von Zellkulturen, sollen mikroskopische Untersuchungen auch während der Stimulation der Zellen durch Bewegungsreize erfolgen. Ein zellhaltiges Hydrogel sollen hierfür auf gefaltzte Papierträger aufgebracht und in kontinuierliche zyklische Bewegungen gebracht werden. Im besten Fall gelingt die Erforschung eines smarten Papierträgers mit integrierter Aktuierung. Bei dem Papierträger handelt es sich um einen Wegwerfartikel. Hier können kostengünstige, integrierte Polymeraktoren eingesetzt werden. Da die Untersuchungen unter Laborbedingungen stattfinden, bietet sich der Einsatz von nicht temperaturkompensierten Aktorgeometrien mit hohen Auslenkungen, bspw. Bimorph-Aktoren, an. Sie bestehen aus einem zweilagigen Materialverbund mit unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten. Der Materialverbund kann direkt auf den Papierträger strukturiert, oder als Endlosmaterial gefertigt, zugeschnitten und aufgeklebt werden. Abbildung 9.3b) zeigt die Konzeptskizze eines smarten Papierträgers mit Bimorph-Aktoren.

Anwendungen für Braille-Flächendisplays

Adaptive stationäre Eingabe- oder Anzeigesysteme

Tastenbasierte Eingabeschnittstellen, so genannte Kiosksysteme, finden sich in Bank-, Fahrkarten- oder anderen Automaten. Die bistabilen Antriebe des haptischen Displays können hier eingesetzt werden, um die Beschriftung einzelner Tasten anzupassen, oder nicht benötigte Tasten in die Bedienoberfläche zu versenken. So kann die dargestellte Information situationsbezogen fokussiert und die Bedienung erleichtert werden. Weiterhin lassen sich beispielsweise Türschilder mit den Antrieben ausstatten, um die Raumbeschriftung blinden Menschen zugänglich zu machen. Hier erweist sich die leistungslose Positionserhaltung der Antriebe als günstig. Ebenso sind die dynamischen Anforderungen sehr gering.

Haptisches Modul für Smartphones

Für eine Weiterentwicklung der bistabilen Antriebe hinsichtlich hoher Dynamik, können Braille-Module für mobile Kommunikationsgeräte erforscht werden. Ein Braille-Flächendisplay an der

Rückseite und in der Größe eines Smartphones kann die audio-visuelle Informationsdarstellung auf dem vorderseitigen Touchscreen um einen haptischen Eindruck ergänzen. Abbildung 9.4 zeigt eine Prinzipskizze des Moduls. Die erfolgreiche Etablierung eines solchen Systems kann eine weitreichende Erforschung integrierter Bedienkonzepte nach sich ziehen.

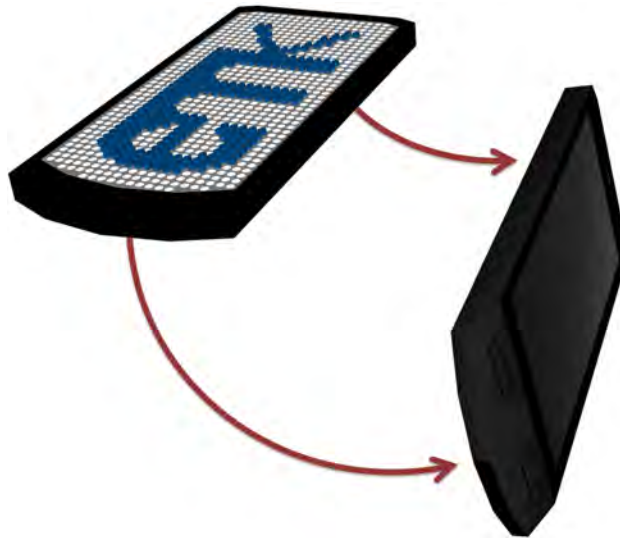


Abbildung 9.4.: Konzeptskizze eines Braille-Moduls zu haptischen Informationsdarstellung auf der Rückseite eines Smartphones

Literaturverzeichnis

Referenzierte Literatur

- [1] TUFTE, O.; CHAPMAN, P. und LONG, D. *Silicon diffused-element piezoresistive diaphragms*. In: „Journal of Applied Physics“ 33.11 (1962), S. 3322–3327.
- [2] YOLE DÉVELOPPEMENT. *Status of the MEMS Industry*. 2014. URL: <http://www.yole.fr/2014-gallery-MEMS.aspx> (abgerufen am 27. Jan. 2016).
- [3] LAERME, F.; SCHILP, A.; FUNK, K. und OFFENBERG, M. *Bosch deep silicon etching: improving uniformity and etch rate for advanced MEMS applications*. In: „12th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems“. Orlando, Florida, USA, 1999, S. 211–216.
- [4] ZHANG, W.; ZAPPE, H. und SEIFERT, A. *Wafer-scale fabricated thermo-pneumatically tunable microlenses*. In: „Light: Science & Applications“ 3 (2014).
- [5] DR. FRITZ FAULHABER GMBH & CO. KG. *Datasheet: Brushless DC-Servomotors 0308H003B*. 2016. URL: https://fmcc.faulhaber.com/resources/img/EN_0308_B_DFF.PDF (abgerufen am 29. Jan. 2016).
- [6] HATZFELD, C. *Experimentelle Analyse der menschlichen Kraftwahrnehmung als ingenieurtechnische Entwurfsgrundlage für haptische Systeme*. Dissertation. Technische Universität Darmstadt, 2013.
- [7] LOOMIS, J. M. *On the tangibility of letters and braille*. In: „Perception and Psychophysics“ 29.01 (1981), S. 37–46.
- [8] EICHER, D. *Entwurf und tiefenlithographische Realisierung mikrostrukturierter Schrittantriebe*. Dissertation. Technische Universität Darmstadt, 2011.
- [9] KOHLSTEDT, A.; DASSINGER, F.; SCHLAAK, H. F.; FRITZSCH, C. und JAKOBY, R. *Monolithic SU-8 based hollow waveguide with integrated electro thermally tunable iris filter for W-band applications*. In: „25th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems“. Paris, France, 29. Jan. 2012, S. 713–716.
- [10] STAAB, M. *Elektrothermisch aktuiertes magnetostatisch bistabiles Mikrorelais für Schaltmatrizen*. Dissertation. Technische Universität Darmstadt, 2013.
- [11] COMTOIS, J. H.; MICHALICEK, M. A. und BARRON, C. C. *Characterization of electrothermal actuators and arrays fabricated in a four-level, planarized surface-micromachined polycrystalline silicon process*. In: „International Conference on Solid-State Sensors and Actuators“. Bd. 2. Chicago, USA, 1997, S. 769–772.
- [12] STAAB, M. und SCHLAAK, H. F. *Novel electrothermally actuated magnetostatic bistable microrelay for telecommunication applications*. In: „24th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems“. Cancun, Mexico, 23. Jan. 2011, S. 1261–1264.
- [13] RIETHMULLER, W. und BENECKE, W. *Thermally excited silicon microactuators*. In: „IEEE Transactions on Electron Devices“ 35.6 (1988), S. 758–763.
- [14] CHEN, W.-C.; CHU, C.-C.; HSIEH, J. und FANG, W. *A reliable single-layer out-of-plane micromachined thermal actuator*. In: „Sensors and Actuators A: Physical“ 103.1-2 (2003), S. 48–58.

-
- [15] VARONA, J.; TECPOYOTL-TORRES, M. und HAMOUI, A. A. *Design of MEMS vertical-horizontal chevron thermal actuators*. In: „Sensors and actuators A: Physical“ 153.1 (2009), S. 127–130.
- [16] KIM, Y.-S.; DAGALAKIS, N. G. und GUPTA, S. K. *Creating large out-of-plane displacement electrothermal motion stage by incorporating beams with step features*. In: „Journal of Micromechanics and Microengineering“ 23.5 (2013).
- [17] SEKI, T.; SAKATA, M.; NAKAJIMA, T. und MATSUMOTO, M. *Thermal buckling actuator for micro relays*. In: „International Conference on Solid State Sensors and Actuators“. Bd. 2. Chicago, USA: IEEE, 1997, S. 1153–1156.
- [18] GUAN, C. und ZHU, Y. *An electrothermal microactuator with Z-shaped beams*. In: „Journal of Micromechanics and Microengineering“ 20.8 (2010), S. 085014.
- [19] CRAGUN, R. und HOWELL, L. L. *Linear thermomechanical microactuators*. In: „ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition“. Nashville, USA: American Society of Mechanical Engineers, 14. Nov. 1999, S. 181–188.
- [20] PARK, S. und HAH, D. *Pre-shaped buckled-beam actuators: Theory and experiments*. In: „Sensors and Actuators A: Physical“ 148.1 (2008), S. 186–192.
- [21] GUCKEL, H.; KLEIN, J.; CHRISTENSON, T.; SKROBIS, K.; LAUDON, M. und LOVELL, E. *Thermomagnetic metal flexure actuators*. In: „Solid-State Sensor and Actuator Workshop“. Hilton Head Island, USA, 22. Juni 1992, S. 73–75.
- [22] NGUYEN, N.-T.; HO, S.-S. und LOW, C. L.-N. *A polymeric microgripper with integrated thermal actuators*. In: „Journal of Micromechanics and Microengineering“ 14.7 (2004), S. 969–974.
- [23] WU, L. und XIE, H. *A large vertical displacement electrothermal bimorph microactuator with very small lateral shift*. In: „Sensors and Actuators A: Physical“ 145-146 (2008), S. 371–379.
- [24] CHANG, J.; MIN, B.-K.; KIM, J. und LIN, L. *Bimorph nano actuators synthesized by focused ion beam chemical vapor deposition*. In: „Microelectronic Engineering“ 86.11 (2009), S. 2364–2368.
- [25] LEE, J. S.; PARK, D. S. W.; NALLANI, A. K.; LEE, G. S. und LEE, J. B. *Sub-micron metallic electrothermal actuators*. In: „Journal of Micromechanics and Microengineering“ 15.2 (2005), S. 322–327.
- [26] NORDSTRÖM ANDERSEN, K. et al. *Multimodal electrothermal silicon microgrippers for nanotube manipulation*. In: „IEEE Transactions on Nanotechnology“ 08.01 (2009), S. 76–85.
- [27] AGRAWAL, V. *A latching MEMS relay for DC and RF applications*. In: „50th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts and the 22nd International Conference on Electrical Contacts“. IEEE, 23. Sep. 2004, S. 222–225.
- [28] WENDIAN, S.; TIEN, N. C. und ZHIHONG, L. *A Highly Reliable Lateral MEMS Switch Utilizing Undoped Polysilicon as Isolation Material*. In: „Journal of Microelectromechanical Systems“ 16.5 (2007), S. 1173–1184.
- [29] COMTOIS, J. H. und BRIGHT, V. M. *Surface micromachined polysilicon thermal actuator arrays and applications*. In: „Solid-State Sensor and Actuator Workshop“. South Carolina, USA, 3. Juni 1996, S. 174–177.
- [30] BUTLER, J. T.; BRIGHT, V. M. und COWAN, W. D. *Average power control and positioning of polysilicon thermal actuators*. In: „Sensors and Actuators A: Physical“ 72.1 (1999), S. 88–97.

-
- [31] KOPKA, P.; HOFFMANN, M. und VOGES, E. *Coupled U-shaped cantilever actuators for 1x4 and 2x2 optical fibre switches*. In: „Journal of Micromechanics and Microengineering“ 10.2 (2000), S. 260–264.
- [32] SCHWEIZER, S.; CALMES, S.; LAUDON, M. und RENAUD, P. *Thermally actuated optical microscanner with large angle and low consumption*. In: „Sensors and Actuators A: Physical“ 76.1 (1999), S. 470–477.
- [33] ATRE, A. *Analysis of out-of-plane thermal microactuators*. In: „Journal of Micromechanics and Microengineering“ 16.2 (2005), S. 205.
- [34] GREITMANN, G. und BUSER, R. A. *Tactile microgripper for automated handling of micro-parts*. In: „Sensors and Actuators A: Physical“ 53.1 (1996), S. 410–415.
- [35] WU, Y.; DING, G.; ZHANG, C.; WANG, J.; MAO, S. und WANG, H. *Magnetostatic bistable MEMS switch with electrothermal actuators*. In: „Electronics letters“ 46.15 (2010), S. 1074–1075.
- [36] SHI, W.; TIEN, N. C. und LI, Z. *A highly reliable lateral MEMS switch utilizing undoped polysilicon as isolation material*. In: „Journal of Microelectromechanical Systems“ 16.5 (2007), S. 1173–1184.
- [37] QIU, J.; LANG, J. H.; SLOCUM, A. H. und WEBER, A. C. *A bulk-micromachined bistable relay with U-shaped thermal actuators*. In: „Journal of Microelectromechanical Systems“ 14.5 (2005), S. 1099–1109.
- [38] SUN, X.-Q.; FARMER, K. und CARR, W. *A bistable microrelay based on two-segment multi-morph cantilever actuators*. In: „The Eleventh Annual International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems“. Heidelberg, Deutschland: IEEE, 1998, S. 154–159.
- [39] GOMM, T.; HOWELL, L. L. und SELFRIDGE, R. H. *In-plane linear displacement bistable micro-relay*. In: „Journal of Micromechanics and Microengineering“ 12.3 (2002), S. 257.
- [40] CHRONIS, N. und LEE, L. P. *Electrothermally Activated SU-8 Microgripper for Single Cell Manipulation in Solution*. In: „Journal of Microelectromechanical Systems“ 14.4 (2005), S. 857–863.
- [41] SOLANO, B. und WOOD, D. *Design and testing of a polymeric microgripper for cell manipulation*. In: „Microelectronic Engineering“ 84.5 (2007), S. 1219–1222.
- [42] LAU, G. K.; DUC, T. C.; GOOSEN, J. F. L.; SARRO, P. M. und KEULEN, F. van. *Power Efficient V-Shape Electro-Thermal Actuator using Constrained SU-8*. In: „International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems“. Lyon, France, 14. Juni 2007, S. 287–290.
- [43] KRECINIC, F.; DUC, T. C.; LAU, G. K. und SARRO, P. M. *Finite element modelling and experimental characterization of an electro-thermally actuated silicon-polymer micro gripper*. In: „Journal of Micromechanics and Microengineering“ 18.6 (2008), S. 064007.
- [44] YANG, J.; LAU, G.; TAN, C.; CHONG, N.; THUBTHIMTHONG, B. und HE, Z. *An electro-thermal micro-actuator based on polymer composite for application to dual-stage positioning systems of hard disk drives*. In: „Sensors and Actuators A: Physical“ 187 (2012), S. 98–104.
- [45] LEE, J.-C. und LEE, D.-W. *Fabrication of a micro XY-stage using SU-8 thermal actuators*. In: „Microelectronic Engineering“ 86.4 (2009), S. 1267–1270.
- [46] REIG, B. et al. *Fabrication of polymer-based optical microsystem arrays suited for the active focusing of vertical laser diodes*. In: „Journal of Micromechanics and Microengineering“ 22.6 (2012).
-

- [47] GREINER, F. *Mikro-Nano-Integration für metallische Mikrosysteme mit vertikal integrierten Federelementen*. Dissertation. Technische Universität Darmstadt, 2013.
- [48] SCHLOSSER, M. und SCHLAAK, H. F. *Intrinsische Schichtspannungen in galvanisch abgeschiedenem Nickel für elektrostatische Mikroaktoren*. In: „Galvanotechnik“. Bd. 103. 12. Eugen G. Leuze, 2012.
- [49] KERN, W. und LEVY, R. *Microelectronic materials and processes*. In: „RA Levy Ed“ (1989), S. 203–206.
- [50] NILSON, R. und GRIFFITHS, S. *Enhanced transport by acoustic streaming in deep trench-like cavities*. In: „Journal of The Electrochemical Society“ 149.04 (2002), G286–G296.
- [51] AZ ELECTRONIC MATERIALS. *Datenblatt: AZ 9200 Photoresist*. 1997. URL: http://www.microchemicals.com/products/photoresists/az_9260.html (abgerufen am 18. Jan. 2016).
- [52] AZ ELECTRONIC MATERIALS. *Datenblatt: AZ 125nXT-10A*. 2009. URL: http://www.microchemicals.com/micro/az_125nxt_photoresist.pdf (abgerufen am 18. Jan. 2016).
- [53] STAAB, M.; GREINER, F.; SCHLOSSER, M. und SCHLAAK, H. F. *Applications of Novel High-Aspect-Ratio Ultrathick UV Photoresist for Microelectroplating*. In: „Journal of Microelectromechanical Systems“ 20.04 (2011), S. 794–796.
- [54] MICROCHEM CORPORATIONS. *Nano SU-8 2000 Negative Tone Photoresist Formulations 2002-2025 - Datasheet*. 1999. URL: www.microchem.com/pdf/SU-82000DataSheet2025-thru2075Ver4.pdf (abgerufen am 3. Feb. 2016).
- [55] WOHLGEMUTH, C. *Entwurf und galvanotechnische Fertigung metallischer Trennmembranen für mediengetrennte Drucksensoren*. Dissertation. Technische Universität Darmstadt, 2008.
- [56] JELINEK, T. W. *Praktische Galvanotechnik*. Lehrbuchreihe Galvanotechnik. Bad Saulgau: Leuze Verlag, 2005, S. 600.
- [57] HAMMOND, R. *Galvanisches Vernickeln in Sulfamatbädern*. Düsseldorf: International Nickel, Deutschland GmbH, 1972, S. 21.
- [58] CLAUSER, H.; WIESEMANN, G.; HINRICHSSEN, V. und STENZEL, J. *Grundgebiete der Elektrotechnik 2: Wechselströme, Drehstrom, Leitungen, Anwendungen der Fourier-, der Laplace- und der Z-Transformation*. Bd. 2. München: Oldenbourg Verlag, 2007.
- [59] MICRO-EPSILON MESSTECHNIK GMBH & Co. KG. *Betriebsanleitung: confocalDT 2451, 2461, 2471*. 2015. URL: www.micro-epsilon.de/download/manuals/man--confocalDT-2451-2461-2471--de-1.pdf (abgerufen am 18. Jan. 2016).
- [60] THE WEBM PROJECT. *WebM: an open web media project*. 2015. URL: <http://www.webmproject.org/> (abgerufen am 18. Jan. 2016).
- [61] ROHDE & SCHWARZ GMBH & Co. KG. *Benutzerhandbuch: HM8143*. 2015. URL: http://www.hameg.com/manuals.0.html?&no_cache=1&L=1 (abgerufen am 18. Jan. 2016).
- [62] HAMEG GMBH. *Handbuch: HM8011-3*. 1995. URL: [http://www.hameg.com/manuals.0.html?&no_cache=1&tx_hmdownloads_pi1\[mode\]=download&tx_hmdownloads_pi1\[uid\]=832](http://www.hameg.com/manuals.0.html?&no_cache=1&tx_hmdownloads_pi1[mode]=download&tx_hmdownloads_pi1[uid]=832) (abgerufen am 18. Jan. 2016).
- [63] FLIR SYSTEMS Co LTD. *Datasheet: FLIR SC655*. 2010. URL: www.instrumart.com/assets/FLIR-SC655-Datasheet.pdf (abgerufen am 18. Jan. 2016).
- [64] MICRO-EPSILON MESSTECHNIK GMBH & Co. KG. *Grundlagen der berührungslosen Temperaturmessung*. 2011. URL: www.micro-epsilon.de (abgerufen am 25. Nov. 2015).

-
- [65] KUBENZ, M.; OSTRZINSKI, U.; REUTHER, F. und GRUETZNER, G. *Effective baking of thick and ultra-thick photoresist layers by infrared radiation*. In: „Microelectronic Engineering“ 67-68.00 (2003), S. 495–501.
- [66] GERLACH, G. *Grundlagen der Mikrosystemtechnik*. München: Carl Hanser Verlag, 1997.
- [67] MICROCHEMICALS GMBH. *Lithographie*. Ulm: Eigendruck, 2012.
- [68] BASF SE. *Datenblatt: Methoxypropylacetat*. 2010. URL: http://www.loesemittel.basf.com/portal/load/fid226737/Methoxypropylacetat_d_10_10.pdf (abgerufen am 18. Jan. 2016).
- [69] BRENNTAG GMBH. *Lösemittel*. 2014. URL: www.brenntag-gmbh.de/Fde/downloads/Deutsch/Loesemitteluebersicht.pdf (abgerufen am 18. Jan. 2016).
- [70] JOHNSON, D.; VOIGT, A.; AHRENS, G. und DAI, W. *Thick epoxy resist sheets for MEMS manufacturing and packaging*. In: „23rd IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems“. Wanchai, Hong Kong, 24. Jan. 2010, S. 412–415.
- [71] DON JOHNSON DEVELOPMENT CORPORATION. *Datasheet: SUEX Epoxy Thick Film Sheets (TDFS)*. 19. Dez. 2011. URL: www.djdevcorp.com (abgerufen am 19. Dez. 2011).
- [72] JOHNSON, D. *Processing SUEX Dry Film for Microfluidic Applications*. In: „37th International Conference on Micro and Nano Engineering“. Berlin, Germany, 19. Sep. 2011.
- [73] HABENICHT, G. *Kleben: Grundlagen, Technologie, Anwendungen*. Berlin: Springer, 1990.
- [74] EL KHOURY, M. *Elektrothermischer Out-Of-Plane-Antrieb mit bistabilen Mechanismen für ein Braille-Flächendisplay*. Masterarbeit. Technische Universität Darmstadt, 2015.
- [75] GOETTERT, J. *SU-8 Dry Laminate Resist for Ultra-tall X-ray Lithography Applications*. In: „HARMST, High Aspect Ratio Micro Structure Technology Workshop“. Himeji, Japan, 17. Juni 2011, S. 29–30.
- [76] ROBIN, C. J.; VISHNOI, A. und JONNALAGADDA, K. N. *Mechanical Behavior and Anisotropy of Spin-Coated SU-8 Thin Films for MEMS*. In: „Journal of Microelectromechanical Systems“ 23.01 (2014), S. 168–180.
- [77] BECNEL, C.; DESTA, Y. und KELLY, K. *Ultra-deep x-ray lithography of densely packed SU-8 features: II. Process performance as a function of dose, feature height and post exposure bake temperature*. In: „Journal of Micromechanics and Microengineering“ 15.06 (2005), S. 1249.
- [78] LIU, G.; TIAN, Y. und KAN, Y. *Fabrication of high-aspect-ratio microstructures using SU8 photoresist*. In: „Microsystem Technologies“ 11.04 (2005), S. 343–346.
- [79] KOUBA, J. et al. *SU-8: promising resist for advanced direct LIGA applications for high aspect ratio mechanical microparts*. In: „Microsystem Technologies“ 13.03 (2007), S. 311–317.
- [80] EZKERRA, A.; FERNANDEZ, L. J.; MAYORA, K. und RUANO-LOPEZ, J. M. *Fabrication of SU-8 free-standing structures embedded in microchannels for microfluidic control*. In: „Journal of Micromechanics and Microengineering“ 17.11 (2007), S. 2264.
- [81] ZHANG, J.; TAN, K. L. und GONG, H. Q. *Characterization of the polymerization of SU-8 photoresist and its applications in micro-electro-mechanical systems (MEMS)*. In: „Polymer Testing“ 20.06 (2001), S. 693–701.
- [82] LUKES, S. J. und DICKENSHEETS, D. L. *SU-8 2002 Surface Micromachined Deformable Membrane Mirrors*. In: „Journal of Microelectromechanical Systems“ 22.01 (2013), S. 94–106.

- [83] CONRADIE, E. H. und MOORE, D. F. *SU-8 thick photoresist processing as a functional material for MEMS applications*. In: „Journal of Micromechanics and Microengineering“ 12.04 (2002), S. 368.
- [84] KOHLSTEDT, A.; STAAB, M. und SCHLAACK, H. F. *Langzeituntersuchungen zur Eignung von SU-8 als Konstruktionswerkstoff*. In: „Mikrosystemtechnik Kongress 2009“. Berlin, Deutschland, 12. Okt. 2009, S. 614–617.
- [85] FENG, R. und FARRIS, R. J. *Influence of processing conditions on the thermal and mechanical properties of SU-8 negative photoresist coatings*. In: „Journal of Micromechanics and Microengineering“ 13.01 (2003), S. 80–88.
- [86] COX, R.; GELORME, J. und GUTIERREZ, S. *Photoresist composition and printed circuit boards and packages made therewith*. CA1289803C. 1991. URL: <http://google.com/patents/CA1289803C?cl=en> (abgerufen am 14. Dez. 2015).
- [87] LABIANCA, N.; GELORME, J.; LEE, K.; COOPER, E.; O’SULLIVAN, E. und SHAW, J. *High aspect ratio optical resist chemistry for MEMS applications*. In: „Proceedings of the Electrochemical Society“ (1995), S. 95–18.
- [88] SHAW, M.; NAWROCKI, D.; HURDITCH, R. und JOHNSON, D. *Improving the process capability of SU-8*. In: „Microsystem Technologies“ 10.01 (2003), S. 1–6.
- [89] CAMPO, A. d. und GREINER, C. *SU-8: a photoresist for high-aspect-ratio and 3D submicron lithography*. In: „Journal of Micromechanics and Microengineering“ 17.06 (2007), R81–R95.
- [90] NORDSTRÖM, M.; JOHANSSON, A.; NOGUERÓN, E. S.; CLAUSEN, B.; CALLEJA, M. und BOISEN, A. *Investigation of the bond strength between the photo-sensitive polymer SU-8 and gold*. In: „Microelectronic Engineering“ 78-79.00 (2005), S. 152–157.
- [91] WOUTERS, K. und PUERS, R. *Diffusing and swelling in SU-8: insight in material properties and processing*. In: „Journal of Micromechanics and Microengineering“ 20.09 (2010), S. 095013.
- [92] LORENZ, H.; DESPONT, M.; FAHRNI, N.; LABIANCA, N.; RENAUD, P. und VETTIGER, P. *SU-8: a low-cost negative resist for MEMS*. In: „Journal of Micromechanics and Microengineering“ 07.03 (1997).
- [93] LORENZ, H.; LAUDON, M. und RENAUD, P. *Mechanical characterization of a new high-aspect-ratio near UV-photoresist*. In: „Microelectronic Engineering“ 41-42 (1998), S. 371–374.
- [94] TEH, W.; DÜRIG, U.; DRECHSLER, U.; SMITH, C. und GÜNTHERODT, H.-J. *Effect of low numerical-aperture femtosecond two-photon absorption on (SU-8) resist for ultrahigh-aspect-ratio microstereolithography*. In: „Journal of Applied Physics“ 97.05 (2005), S. 054907.
- [95] PARIDA, O. P. und BHAT, N. *Characterization of optical properties of SU-8 and fabrication of optical components*. In: „Proceedings of the International Conference on Optics and Photonics“. Bd. 30. Chandigarh, India, 2009.
- [96] BORREMAN, A.; MUSA, S.; KOK, A.; DIEMEER, M. und DRIESSEN, A. *Fabrication of polymeric multimode waveguides and devices in SU-8 photoresist using selective polymerization*. In: „IEEE/LEOS Benelux Chapter 2002 Annual Symposium“. Amsterdam, Netherlands, 9. Dez. 2002, S. 83–86.
- [97] THORPE, J.; STEENSON, D. und MILES, R. *High frequency transmission line using micromachined polymer dielectric*. In: „Electronics Letters“ 34.12 (1998), S. 1237–1238.
- [98] VOSKERICIAN, G. et al. *Biocompatibility and biofouling of MEMS drug delivery devices*. In: „Biomaterials“ 24.11 (2003), S. 1959–1967.

-
- [99] KOHLSTEDT, A. und SCHLAAK, H. F. *Tiefenlithographieprozess für SU-8-Dickschicht-Funktionsstrukturen auf FR4-Leiterplattenmaterial*. In: „2. GMM Workshop - Technologien und Werkstoffe der Mikrosystem- und Nanotechnik“. Darmstadt, Deutschland, 10. Mai 2010.
- [100] JIANG, K.; LANCASTER, M.; LLAMAS-GARRO, I. und JIN, P. *SU-8 Ka-band filter and its microfabrication*. In: „Journal of Micromechanics and Microengineering“ 15.08 (2005), S. 1522.
- [101] BARBER, R. L.; GHANTASALA, M. K.; DIVAN, R.; VORA, K. D.; HARVEY, E. C. und MANCINI, D. C. *Optimisation of SU-8 processing parameters for deep X-ray lithography*. In: „Microsystem Technologies“ 11.04 (2005), S. 303–310.
- [102] LIU, J. et al. *Process research of high aspect ratio microstructure using SU-8 resist*. In: „Microsystem Technologies“ 10.04 (2004), S. 265–268.
- [103] WILLIAMS, J. D. und WANG, W. *Study on the postbaking process and the effects on UV lithography of high aspect ratio SU-8 microstructures*. In: „Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS“ 03.04 (2004), S. 563–568.
- [104] YOON, Y.; LEE, D.-W. und LEE, J.-B. *Surface modified nano-patterned SU-8 pillar array optically transparent super-hydrophobic thin film*. In: „Journal of Micromechanics and Microengineering“ 22.03 (2012), S. 035012.
- [105] SCHLOSSER, M.; STAAB, M. und SCHLAAK, H. F. *Nasschemisches Entfernen dicker SU-8-Schichten aus galvanisch abgeschiedenen Strukturen*. In: „2. GMM Workshop - Technologien und Werkstoffe der Mikrosystem- und Nanotechnik“. Darmstadt, Deutschland, 10. Mai 2010.
- [106] KOUBA, J.; BEDNARZIK, M.; ENGELKE, R.; AHRENS, G.; MILLER, H. und HAASE, D. *Optimizing SU-8 resist to fabricate micro-metallic structures*. In: „Solid State Technology“ 49.04 (2006), S. 39–44.
- [107] BECNEL, C.; DESTA, Y. und KELLY, K. *Ultra-deep x-ray lithography of densely packed SU-8 features: I. An SU-8 casting procedure to obtain uniform solvent content with accompanying experimental results*. In: „Journal of Micromechanics and Microengineering“ 15.06 (2005), S. 1242.
- [108] LEE, S. J.; SHI, W.; MACIEL, P. und CHA, S. W. *Top-edge profile control for SU-8 structural photoresist*. In: „15th Biennial Microelectronics Symposium“. 30. Juni 2003, S. 389–390.
- [109] MICROCHEM CORPORATIONS. *SU-8 2000 Permanent Epoxy Negative Photoresist processing guidelines for: SU-8 2025, SU-8 2035, SU-8 2050 and SU-8 2075*. 2008. URL: www.microchem.com/pd/SU-82000DataSheet2000_5thru2015Ver4.pdf (abgerufen am 3. Feb. 2016).
- [110] GAUDET, M.; CAMART, J. C.; BUCHAILLOT, L. und ARSCOTT, S. *Variation of absorption coefficient and determination of critical dose of SU-8 at 365 nm*. In: „Applied Physics Letters“ 88.02 (2006),
- [111] LI, B.; LIU, M. und CHEN, Q. *Low-stress ultra-thick SU-8 UV photolithography process for MEMS*. In: „Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS“ 04.04 (2005),
- [112] TAN, T. L.; WONG, D.; LEE, P.; RAWAT, R. S.; SPRINGHAM, S. und PATRAN, A. *Characterization of chemically amplified resist for X-ray lithography by Fourier transform infrared spectroscopy*. In: „Thin Solid Films“ 504.01-02 (2006), S. 113–116.
- [113] EHRENSTEIN, G. W.; RIEDEL, G. und TRAWIEL, P. *Thermal analysis of plastics: theory and practice*. München: Carl Hanser Verlag, 2012.
-

-
- [114] VOGEL, J.; FEIGE, H.-J.; SAUPE, J.; SCHUBERT, S. und GRIMM, J. *Mechanical material characterization of photosensitive polymers*. In: „Microsystem Technologies“ 20 (10-11 2013), S. 1975–1979.
- [115] ELBRECHT, L.; STORM, U.; CATANESCU, R. und BINDER, J. *Comparison of stress measurement techniques in surface micromachining*. In: „Journal of Micromechanics and Microengineering“ 07.03 (1997), S. 151.
- [116] GREINER, F.; HAUS, H.; QUEDNAU, S.; SCHLAAK, H. F.; STAAB, M. und WINTERSTEIN, T. *Integrationsorientierte Verfahren zur Herstellung hybrider Mikrosysteme INSIGHT, FKZ 16SV5053*. 2011. URL: <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/55980/>.
- [117] KERFOOT, D. G. E. *Nickel*. In: „Ullmann’s encyclopedia of industrial chemistry“. Hrsg. von GERHARTZ, W. Weinheim: Wiley-VCH Verlag, 2005.
- [118] BECKMANN, H.-W. *Friedrich-Tabellenbuch Elektrotechnik, Elektronik*. Köln: Bildungsverlag EINS, 2012.
- [119] LUO, J. K.; FLEWITT, A. J.; SPEARING, S. M.; FLECK, N. A. und MILNE, W. I. *Young’s modulus of electroplated Ni thin film for MEMS applications*. In: „Materials Letters“ 58.17-18 (2004), S. 2306–2309.
- [120] FRITZ, T. *Charakterisierung galvanisch abgeschiedener Nickel- und Nickel-Wolfram-Schichten für mikrotechnische Anwendungen*. Dissertation. RWTH Aachen, 2002.
- [121] HEMKER, K. und LAST, H. *Microsample tensile testing of LIGA nickel for MEMS applications*. In: „Materials Science and Engineering: A“ 319 (2001), S. 882–886.
- [122] SHARPE JR, W. N. und McALEAVEY, A. *Tensile properties of LIGA nickel*. In: „Micromachining and Microfabrication“. International Society for Optics und Photonics, 1998, S. 130–137.
- [123] HARSCH, S. *Untersuchungen zur Herstellung von Mikrostrukturen großer Strukturhöhe durch Galvanoformung im Nickelsulfamatelektrolyten*. Dissertation. Universität Karlsruhe, 1988.
- [124] WINKLER, L. *Galvanoformung mit Nickel*. Düsseldorf: International Nickel Deutschland GmbH, 1969.
- [125] DIGGIN, M. B. *Nickel Plating from the Sulfamate Solution*. In: „Transactions of the Institute of Metal Finishing“ 31 (1954).
- [126] BARRETT, R. *Nickel Plating from a Sulfamate Bath*. In: „41. Annual Convention of the American Electroplaters Society“. Shelton, Connecticut, 13. Juli 1954.
- [127] FANNER, D. und HAMMOND, R. *The properties of nickel electrodeposited from a sulfamate bath*. In: „Transactions of the Institute of Metal Finishing“ 36 (1959), S. 32–42.
- [128] WINTERSTEIN, T. *Optische Ablenkeinrichtung auf Basis eines Wanderkeil-Antriebs mit galvanisch abgeschiedener Nickel-Elektrode*. Diplomarbeit. Technische Universität Darmstadt, 2010.
- [129] VALDES, L. B. *Resistivity Measurements on Germanium for Transistors*. In: „Proceedings of the Institut of Radio Engineers“ 42.02 (1954), S. 420–427.
- [130] SMITS, F. *Measurement of sheet resistivities with the four point probe*. In: „Bell System Technical Journal“ 37.03 (1958), S. 711–718.
- [131] MAISSEL, L. und GLANG, R. *Handbook of thin film technology*. New York: McGraw-Hill Book Company, 1970.
- [132] KLEPPMANN, W. *Taschenbuch Versuchsplanung*. München: Carl Hanser Verlag, 2006.

-
- [133] KANANI, N. *Galvanotechnik - Grundlagen, Verfahren, Praxis*. München Wien: Carl Hanser Verlag, 2000.
- [134] JELINEK, T. *Prüfung von funktionellen metallischen Schichten*. Bad Saulgau: Leuze Verlag, 1997.
- [135] STAAB, M.; EICHER, D. und SCHLAACK, H. F. *Aufbau eines Motion-Analyzers zur Charakterisierung von MEMS-Strukturen*. In: „Bildverarbeitung in der Mess- und Automatisierungstechnik“. Regensburg, Germany: VDI-Verl., 27. Nov. 2007.
- [136] ENIKOV, E. T. und LAZAROV, K. *PCB-integrated metallic thermal micro-actuators*. In: „Sensors and Actuators A: Physical“ 105.1 (2003), S. 76–82.
- [137] SOLANO, B.; ROLT, S. und WOOD, D. *Thermal and mechanical analysis of an SU8 polymeric actuator using infrared thermography*. In: „Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science“ 222.1 (2008), S. 73–86.
- [138] BERGMAN, T. L.; INCROPERA, F. P. und LAVINE, A. S. *Fundamentals of heat and mass transfer*. New Jersey, USA: John Wiley und Sons, 2011.
- [139] ANSYS, INC. *Documentation for ANSYS Workbench Release 15.0*. 2013.
- [140] KLEIN, B. *FEM: Grundlagen und Anwendungen der Finite-Elemente-Methode*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2013.
- [141] N., G. N. und A., E. *Chemie der Elemente*. Bd. 93. 2. Weinheim: VCH Verlagsgesellschaft, 1988, S. 227–228.
- [142] LEITON. *Datenblatt Rev. 2.4-starre FR4 Leiterplatten*. 2013. URL: www.leiton.de/formulare/Datenblatt%20-%20Starre%20FR4%20Leiterplatten%20-%20Rev%202.4.pdf (abgerufen am 21. Aug. 2015).
- [143] BUNGARD ELEKTRONIK. *Technische Daten Original Bungard fotobeschichtetes Basismaterial FR4*. 2015. URL: www.bungard.de/downloads/IPC4101D.pdf (abgerufen am 21. Aug. 2015).
- [144] MAHONY, J. *Heat transfer at small Grashof numbers*. In: „Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences“. Bd. 238. The Royal Society, 1957, S. 412–423.
- [145] LEWANDOWSKI, W. M.; RADZIEMSKA, E.; BUZUK, M. und BIESZK, H. *Free convection heat transfer and fluid flow above horizontal rectangular plates*. In: „Applied Energy“ 66.2 (2000), S. 177–197.
- [146] LIANG, X.-G. und GUO, Z.-Y. *The Scaling Effect on the Thermal Processes at Mini/Microscale*. In: „Heat Transfer Engineering“ 27.4 (2006), S. 30–40.
- [147] HILL, D.; SZYSZKOWSKI, W. und BORDATCHEV, E. *On modeling and computer simulation of an electro-thermally driven cascaded nickel micro-actuator*. In: „Sensors and Actuators A: Physical“ 126.1 (2006), S. 253–263.
- [148] GEISBERGER, A. A.; SARKAR, N.; ELLIS, M. und SKIDMORE, G. D. *Electrothermal properties and modeling of polysilicon microthermal actuators*. In: „Journal of Microelectromechanical Systems“ 12.4 (2003), S. 513–523.
- [149] PEIRS, J.; REYNAERTS, D. und VAN BRUSSEL, H. *Scale effects and thermal considerations for micro-actuators*. In: „IEEE International Conference on Robotics and Automation“. Bd. 2. 16. Mai 1998, 1516–1521 vol.2.
- [150] MANGINELL, R. P.; ROSATO, D. A.; BENSON, D. A. und FRYE-MASON, G. C. *Finite element modeling of a microhotplate for microfluidic applications*. In: „Modeling and Simulation of Microsystems“. 1999, S. 663–666.

- [151] JAIN, A.; NESS, K.; MCCONNELL, A.; JIANG, L. und GOODSON, K. *Design, fabrication and thermal characterization of a MEMS device for control of nerve cell growth*. In: „ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition“. Washington, USA: American Society of Mechanical Engineers, 2003, S. 251–257.
- [152] HU, X. J.; JAIN, A. und GOODSON, K. E. *Investigation of the natural convection boundary condition in microfabricated structures*. In: „International Journal of Thermal Sciences“ 47.7 (2008), S. 820–824.
- [153] KADOYA, K.; MATSUNAGA, N. und NAGASHIMA, A. *Viscosity and Thermal Conductivity of Dry Air in the Gaseous Phase*. In: „Journal of Physical and Chemical Reference Data“ 14.4 (1985), S. 947–970.
- [154] BAEHR, H. D.; STEPHAN, K. und STEPHAN, K. *Wärme- und Stoffübertragung*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2006.
- [155] VELMATHI, G.; RAMSHANKER, N. und MOHAN, S. *Design, Electro-Thermal simulation and geometrical optimization of double spiral shaped microheater on a suspended membrane for gas sensing*. In: „36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society“. 7. Nov. 2010, S. 1258–1262.
- [156] SINHA, S.; ROY, S. und SARKAR, C. *Design and electro-thermal analysis of microheater for low temperature MEMS based gas sensor*. In: „International Symposium on Devices MEMS, Intelligent Systems and Communication“. International Journal of Computer Applications, 2011, S. 26–31.
- [157] SUJATHA, L.; ARAVIND, V. S. S.; PADAMAPRIYA, R. und PREETHI, B. *Design and Analysis of Micro-Heaters using COMSOL Multiphysics For MEMS Based Gas Sensor*. In: „COMSOL Conference“. Bangalore, 2012.
- [158] SCHNELL, W.; GROSS, D. und HAUGER, W. *Technische Mechanik: Band 2: Elastostatik*. Bd. 216. Heidelberg Berlin: Springer-Verlag, 2013.
- [159] EHRENSTEIN, G. W. und PONGRATZ, S. *Beständigkeit von Kunststoffen*. München: Carl Hanser Verlag, 2007.
- [160] LIAN, K.; LING, Z.-g. und LIU, C. *Thermal stability of SU-8 fabricated microstructures as a function of photo initiator and exposure doses*. In: „International Society for Optics and Photonics“. Bd. 4980. 2003, S. 208–212.
- [161] NAMAZU, T.; INOUE, S.; TAKIO, K.; FUJITA, T.; MAENAKA, K. und KOTERAZAWA, K. *Visco-elastic properties of micron-thick SU-8 polymers measured by two different types of uniaxial tensile tests*. In: „18th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems“. 2005, S. 447–450.
- [162] WÖHLER, A. *Über die Festigkeitsversuche mit Eisen und Stahl*. In: „Zeitschrift für Bauwesen“. Berlin: Königlich-Technische Bau-Deputation, 1870.
- [163] SON, D.; KIM, J.-j.; KIM, J.-Y. und KWON, D. *Tensile properties and fatigue crack growth in LIGA nickel MEMS structures*. In: „Materials Science and Engineering: A“ 406.01-02 (2005), S. 274–278.
- [164] BAKER, M. S.; PLASS, R. A.; HEADLEY, T. J. und WALRAVEN, J. A. *Compliant Thermo-Mechanical MEMS Actuators LDRD*. Final Report. Sandia National Laboratories, 2004.
- [165] APPLE INC. *Support Apple*. 2015. URL: <https://support.apple.com/de-de/HT201559> (abgerufen am 7. Okt. 2014).
- [166] XORO. *XORO HRS 9500IP*. 2015. URL: <http://www.xoro.de/produkte/receiver-fur-digitales-satellitenfernsehen-dvb-s-dvb-s2/hd-2/hrs9500ip/hrs9500ip-fernbedienung/> (abgerufen am 7. Okt. 2014).

-
- [167] ISAACS, J.; MARTINEZ, S.; SCOTT-BROWN, K.; MILNE, A.; EVANS, A. und GILMOUR, D. *Mobile technology and e-inclusion. Applications and Services for Quality of Life*. In: „Universal Access in Human-Computer Interaction“. Hrsg. von CONSTANTINE STEPHANIDIS, M. A. Berlin Heidelberg: Springer, 2013, S. 626–635.
- [168] ABDULRAZAK, B.; MALIK, Y.; ARAB, F. und REID, S. *PhonAge: Adapted SmartPhone for Aging Population*. In: „11th International Conference on Smart Homes and Health Telematics“. Hrsg. von BISWAS, J. und KOBAYASHI, H. Bd. 7910. Berlin Heidelberg: Springer, 2013, S. 27–35.
- [169] FUCHSBERGER, V. *Ambient assisted living: elderly people's needs and how to face them*. In: „1st ACM international workshop on Semantic ambient media experiences“. New York: ACM, 31. Okt. 2008, S. 21–24.
- [170] LEPORINI, B.; BUZZI, M. C. und BUZZI, M. *Interacting with mobile devices via VoiceOver: usability and accessibility issues*. In: „24th Australian Computer-Human Interaction Conference“. ACM, 2012, S. 339–348.
- [171] PLOS, O. und BUISINE, S. *Universal design for mobile phones: a case study*. In: „CHI06 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems“. Montreal, Quebec, Canada: ACM, 2006, S. 1229–1234.
- [172] MCGOOKIN, D.; BREWSTER, S. und JIANG, W. *Investigating touchscreen accessibility for people with visual impairments*. In: „5th Nordic conference on Human-computer interaction: building bridges“. ACM, 2008, S. 298–307.
- [173] BRUUN, A.; HAHN, C.; VOIGHT, B. und SCHULTZ, M. *Touch, and you will gaze: Elderly and youngers' use of remote controls in interacting with a healthcare portal*. In: „International Conference on Informatics, Management and Technology in Healthcare“. 2013, S. 135–137.
- [174] SAMSUNG GROUP. *Samsung Jitterbug Phone*. 2013. URL: <http://www.samsung.com/us/mobile/cell-phones/SCH-R220ZRADYN> (abgerufen am 7. Okt. 2014).
- [175] SEKI. *SeKi Grande Fernbedienung*. 2015. URL: <http://www.my-seki.de/de/seki-fernbedienungen/seki-grande> (abgerufen am 7. Okt. 2014).
- [176] KURNIAWAN, S.; MAHMUD, M. und NUGROHO, Y. *A study of the use of mobile phones by older persons*. In: „CHI'06 extended abstracts on Human factors in computing systems“. ACM, 2006, S. 989–994.
- [177] MASSIMI, M.; BAECKER, R. M. und WU, M. *Using participatory activities with seniors to critique, build, and evaluate mobile phones*. In: „9th international ACM SIGACCESS conference on Computers and accessibility“. Tempe, Arizona, USA: ACM, 2007.
- [178] HOLZINGER, A.; SEARLE, G. und NISCHELWITZER, A. *On Some Aspects of Improving Mobile Applications for the Elderly*. In: „Universal Access in Human Computer Interaction. Coping with Diversity“. Hrsg. von STEPHANIDIS, C. Bd. 4554. Lecture Notes in Computer Science. Berlin Heidelberg: Springer, 2007. Kap. 103, S. 923–932.
- [179] MALLINIUS, S.; ROSSI, M. und TUUNAINEN, V. K. *Factors affecting the adoption and use of mobile devices and services by elderly people-results from a pilot study*. In: „6th Annual Global Mobility Roundtable“ (2007).
- [180] ROWELL, J. und ONGAR, S. *The world of touch: an international survey of tactile maps. Part 2: design*. In: „British Journal of Visual Impairment“ 21.3 (2003), S. 105–110.
- [181] KANE, S. K.; WOBROCK, J. O. und LADNER, R. E. *Usable gestures for blind people: understanding preference and performance*. In: „SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems“. ACM, 2011, S. 413–422.
-

-
- [182] HÄIKIÖ, J.; WALLIN, A.; ISOMURSU, M.; AILISTO, H.; MATINMIKKO, T. und HUOMO, T. *Touch-based user interface for elderly users*. In: „9th international conference on Human computer interaction with mobile devices and services“. Singapore: ACM, 2007, S. 289–296.
- [183] PETER, C. et al. *AGNES: Connecting people in a multimodal way*. In: „Journal on Multimodal User Interfaces“ 07.03 (2013), S. 229–245.
- [184] GOODMAN, J.; BREWSTER, S. und GRAY, P. *Older people, mobile devices and navigation*. In: „HCI and the Older Population“ (2004), S. 13–14.
- [185] LORENZ, A.; MIELKE, D.; OPPERMAN, R. und ZAHL, L. *Personalized mobile health monitoring for elderly*. In: „9th international conference on Human computer interaction with mobile devices and services“. Singapore: ACM, 2007, S. 297–304.
- [186] KOBAYASHI, M.; HIYAMA, A.; MIURA, T.; ASAKAWA, C.; HIROSE, M. und IFUKUBE, T. *Elderly User Evaluation of Mobile Touchscreen Interactions*. In: „Human-Computer Interaction“. Hrsg. von CAMPOS, P. und GRAHAM, N. Bd. 6946. Lecture Notes in Computer Science. Berlin Heidelberg: Springer, 2011. Kap. 9, S. 83–99.
- [187] STÖSSEL, C.; WANDKE, H. und BLESSING, L. *Gestural Interfaces for Elderly Users: Help or Hindrance?* In: „Gesture in Embodied Communication and Human-Computer Interaction“. Hrsg. von KOPP, S. und WACHSMUTH, I. Bd. 5934. Lecture Notes in Computer Science. Berlin Heidelberg: Springer, 2010. Kap. 24, S. 269–280.
- [188] KOBAYASHI, D.; ASAMI, Y. und YAMAMOTO, S. *Study on Haptic Interaction with Digital Map on Mobile Device. Interacting with Information*. In: „Human Interface and the Management of Information“. Hrsg. von SMITH, M. und SALVENDY, G. Bd. 6771. Lecture Notes in Computer Science. Berlin Heidelberg: Springer, 2011. Kap. 50, S. 443–449.
- [189] HOLZINGER, A.; SAMMER, P. und HOFMANN-WELLENHOF, R. *Mobile Computing in Medicine: Designing Mobile Questionnaires for Elderly and Partially Sighted People*. In: „Computers Helping People with Special Needs“. Hrsg. von MIESENBERGER, K. und KLAUS, J. Bd. 4061. Lecture Notes in Computer Science. Berlin Heidelberg: Springer, 2006. Kap. 107, S. 732–739.
- [190] CIESLA, C. *A New Dimension of Touch*. 2014. URL: www.tactustechnology.com (abgerufen am 30. Jan. 2014).
- [191] SPINDLER, M.; KRAUS, M. und WEBER, G. *A Graphical Tactile Screen-Explorer*. In: „Computers Helping People with Special Needs“. Hrsg. von MIESENBERGER, K. und KLAUS, J. Bd. 6180. Lecture Notes in Computer Science. Berlin Heidelberg: Springer, 2010. Kap. 75, S. 474–481.
- [192] TARAS, C.; RASCHKE, M.; SCHLEGEL, T.; ERTL, T.; PRESCHER, D. und WEBER, G. *Improving Screen Magnification Using the HyperBraille Multiview Windowing Technique*. In: „Computers Helping People with Special Needs“. Hrsg. von MIESENBERGER, K. und KLAUS, J. Bd. 6180. Lecture Notes in Computer Science. Berlin Heidelberg: Springer, 2010. Kap. 75, S. 506–512.
- [193] MCCALLUM, D.; UNGAR, S. und JEHOEL, S. *An evaluation of tactile directional symbols*. In: „British Journal of Visual Impairment“ 24.02 (2006), S. 83–92.
- [194] ZENG, L. und WEBER, G. *Accessible Maps for the Visually Impaired*. In: „IFIP INTERACT 2011 Workshop on ADDW“. Bd. 792. Lisbon, Portugal, 2011, S. 54–60.
- [195] PETRIE, H.; JOHNSON, V.; McNALLY, P.; MORLEY, S.; O’NEILL, A. M. und MAJOE, D. *Inexpensive tactile interaction for blind computer users: two application domains*. In: „IEEE Colloquium on Developments in Tactile Displays“. 1997, S. 2/1–2/3.

-
- [196] METEC INGENIEUR AG. *Hyperbraille*. 2007. URL: <http://hyperbraille.de/> (abgerufen am 7. Okt. 2015).
- [197] HANDY TECH. *Braille Sense U2 MINI*. 2015. URL: <https://handytech.de/de/produkte/braille-und-notizgeraete/braillenotizgeraete/braille-sense-u2-mini> (abgerufen am 7. Okt. 2014).
- [198] KACZMAREK, K. A. und BACH-Y-RITA, P. *Tactile displays*. In: „Virtual environments and advanced interface design“ (1995), S. 349–414.
- [199] HOWE, R. D. *The shape of things to come: pin-based tactile shape displays*. In: „4th International Conference Eurohaptics“. Citeseer, 2004, S. 2–11.
- [200] ADA, D. A. *Americans with Disabilities Act*. In: „Title II Public Services and Transportation“ (2011).
- [201] HATZFELD, C. und WERTHSCHÜTZKY, R. *Simulation und Auswahl von psychometrischen Verfahren zur Ermittlung von Kennwerten menschlicher Wahrnehmung*. In: „tm–Technisches Messen“ 81.4 (2014), S. 173–181.
- [202] DELLMANN, L. et al. *Fabrication process of high aspect ratio elastic and SU-8 structures for piezoelectric motor applications*. In: „Sensors and Actuators A: Physical“ 70.1 (1998), S. 42–47.
- [203] GEBE COMPUTER UND PERIPHERIE GMBH. *www.tastaturen.com - Herstellung kundenspezifischer Silikonschaltmatten*. 2015. URL: <http://tastaturen.com> (abgerufen am 10. Nov. 2015).
- [204] BAUKNECHT, J.; EHLERS, A. und TEICHMÜLLER, A.-K. *Steigerung der Lebensqualität durch tragbare, örtlich aufgelöste Displaysysteme für die taktile Kommunikation STARK, FKZ 16SV7106*. Abschlussbericht. Forschungsgesellschaft für Gerontologie e.V., 2015.
- [205] WALKER, P. und TARN, W. H. *CRC handbook of metal etchants*. CRC press, 1990.
- [206] MICROCHEMICALS GMBH. *Datenblatt: TechniStrip Cr01 (the former Chromium Etchant No.1)*. 2011. URL: http://microchemicals.com/micro/tf/chromium_etchants.pdf (abgerufen am 12. Jan. 2016).
- [207] HILD, R.; DAVID, C.; MÜLLER, H. U.; VÖLKELE, B.; KAYSER, D. R. und GRUNZE, M. *Formation and Characterization of Self-assembled Monolayers of Octadecyltrimethoxysilane on Chromium: Application in Low-Energy Electron Lithography*. In: „Langmuir“ 14.02 (1. Jan. 1998), S. 342–346.
- [208] SPANIER, G. *Entwicklung und Optimierung von HF-Mikrofederkontaktelementen zur temporären Kontaktierung von Mikrosystemkomponenten*. Dissertation. RWTH Aachen, 2007.
- [209] WILLIAMS, K. R.; GUPTA, K. und WASILIK, M. *Etch rates for micromachining processing - Part II*. In: „Journal of Microelectromechanical Systems“ 12.06 (2003), S. 761–778.
- [210] WILLIAMS, K. R. und MULLER, R. S. *Etch rates for micromachining processing - Part I*. In: „Journal of Microelectromechanical Systems“ 05.04 (1996), S. 256–269.
- [211] BINDER, S. *Optimierung von plasmagestützten Polymerentfernungsprozessen*. Bachelorarbeit. Technische Universität Darmstadt, 2011.
- [212] ROTH, J. *Funktionalisierung von Silikonoberflächen*. Dissertation. Technische Universität Dresden, 2008.
- [213] LIENHARD, J. H. *A heat transfer textbook*. Massachusetts, USA: Courier Corporation, 2013.
- [214] KLAN, H. und THESS, A. *F2 Wärmerübertragung durch freie Konvektion: Wäßenströmung*. In: „VDI-Wärmeatlas“. VDI-Buch. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2013. Kap. 38, S. 757–764.
-

-
- [215] MERKER, G. P. und EIGLMEIER, C. *Fluid- und Wärmermetransport, Wärmeübertragung*. Stuttgart: Teubner, 1999.
 - [216] DEMTRÖDER, W. *Experimentalphysik 1: Mechanik und Wärme*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2012.
 - [217] DEDER, A. *Optimierung elektrothermomechanischer Mikroaktorik aus dem negativen Photolack SU-8*. Bachelorarbeit. Technische Universität Darmstadt, 2011.

Eigene Veröffentlichungen

- [218] WINTERSTEIN, T. und SCHLAAK, H. F. *Normally latched linear inchworm drive with electrothermal actuation for fluidic applications*. In: „13th International Conference on New Actuators and 7th International Exhibition on Smart Actuators and Drive Systems“. Bremen, Germany, 10. Juni 2012, S. 713–716.
- [219] WINTERSTEIN, T.; NORONHA, K. M. und SCHLAAK, H. F. *Electrothermal Pseudo Bimorph Actuators Made of SU-8 with Improved Mechanical Performance*. In: „14th International Conference on New Actuators and 8th International Exhibition on Smart Actuators and Drive Systems“. Bremen, Germany, 23. Juni 2014.
- [220] EL KHOURY, M.; NAKIC, C.; WINTERSTEIN, T. und SCHLAAK, H. F. *Electrothermal Out-of-plane drive with novel bistable mechanism for portable Braille displays*. In: „29th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems“. Shanghai, China, 24. Jan. 2016.
- [221] MATYSEK, M.; LOTZ, P.; WINTERSTEIN, T. und SCHLAAK, H. F. *Dielectric Elastomer Actuators for Tactile Displays*. In: „IEEE World Haptics 2009, 3rd Joint Eurohaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems“. Salt Lake City, UT, USA, 18. März 2009, S. 290–295.
- [222] SCHLOSSER, M.; WINTERSTEIN, T. und SCHLAAK, H. F. *Electrostatic Moving Wedge Actuator Made of Electroplated Nickel*. In: „12th International Conference on New Actuators and 6th International Exhibition on Smart Actuators and Drive Systems“. Bremen, Germany, 14. Juni 2010, S. 778–781.
- [223] WINTERSTEIN, T.; STAAB, M.; RIEMER, D. und SCHLAAK, H. F. *Konstruktionskatalog für mechanische, elektrische und magnetische Eigenschaften von galvanisch abgeschiedenem Nickel*. In: „Mikrosystemtechnik Kongress 2011“. Darmstadt, Deutschland, 10. Okt. 2011, S. 670–673.
- [224] STAAB, M.; WINTERSTEIN, T.; RIEMER, D. und SCHLAAK, H. F. *Magnetische Eigenschaften von galvanisch abgeschiedenem Nickel*. In: „Galvanotechnik“. Bd. 103. 02. 2012.
- [225] WINTERSTEIN, T.; GREINER, F.; SCHLAAK, H. F. und PULLICH, L. *A blended-learning concept for basic lectures in electrical engineering: A practical report*. In: „International Conference on Education and e-Learning Innovations (ICEELI)“. Sousse, Tunisia, 1. Juli 2012.
- [226] WINTERSTEIN, T.; STAAB, M.; RIEMER, D. und SCHLAAK, H. F. *Elektrische Eigenschaften von galvanisch abgeschiedenem Nickel*. In: „Galvanotechnik“. Bd. 103. 06. Eugen G. Leuze, 2012.
- [227] WINTERSTEIN, T. und SCHLAAK, H. F. *Charakterisierung des Schrumpfs von SU-8 für intrinsisch vorgespannte Mikrostrukturen*. In: „Mikrosystemtechnikkongress 2013“. Aachen, Deutschland, 14. Okt. 2013.
- [228] WINTERSTEIN, T.; STAAB, M.; NAKIC, C.; FEIGE, H.-J.; VOGEL, J. und SCHLAAK, H. F. *SU-8 Electrothermal Actuators: Optimization of Fabrication and Excitation for Long-Term Use*. In: „Micromachines, Special Issue Microactuators“ (2014), S. 1310–1322.
- [229] LÄMMLER, D.; WINTERSTEIN, T.; SCHLOSSER, M. und SCHLAAK, H. F. *Untersuchung der lokalen Schichthöhe und Schichtspannung von galvanisch abgeschiedenem Nickel für elektrostatische Mikroaktoren*. In: „Jahrbuch der Oberflächentechnik“. Hrsg. von SÖRGEL, T. Bad Saulgau: LEUZE Verlag, 2015.
- [230] WINTERSTEIN, T.; ISLAM, S.; EL KHOURY, M.; NAKIC, C. und SCHLAAK, H. F. *Integration kostengünstiger elektrothermischer Polymeraktoren in Leiterplattensysteme*. In: „Mikrosystemtechnikkongress 2015“. Karlsruhe, Deutschland, 26. Okt. 2015.

-
-
- [231] NAKIC, C.; EL KHOURY, M.; WINTERSTEIN, T.; STAAB, M. und SCHLAAK, H. F. *Aktoranordnung*. 2015112512491700DE. 2015.
- [232] EL KHOURY, M.; WINTERSTEIN, T. und SCHLAAK, H. F. *Cost-efficient manufacturing of a high deflection electrothermal drive for switching applications*. In: „15th International Conference on New Actuators and 9th International Exhibition on Smart Actuators and Drive Systems“. Bremen, Germany, 13. Juni 2016.
- [233] NAKIC, C. et al. *Development of an electrothermal micro positioning platform for laser targets with two degrees of freedom*. In: „International Conference on Manipulation, Automation and Robotics at Small Scales“. Paris, France, 18. Juli 2016.
-

Betreute studentische Arbeiten

- [234] NORONHA, K. M. *Design and fabrication of electrothermal pseudo-bimorph actuators with an improved performance*. International Research Experience Program (IREP). Technische Universität Darmstadt, 2013.
- [235] DEDER, A.; NEUMANN, K.; ROSE, A. und WAGNER, S. *Aufbau eines Mikropositionierantriebs*. Praktische Entwicklungsmethodik II (PEM). Technische Universität Darmstadt, 2011.
- [236] EISSFELDT, A.; HNAIEN, F.; NAIDANDORJ, K. und MINAMISAVA, C. *Entwicklung eines miniaturisierten Insulindosierers*. Praktische Entwicklungsmethodik III (PEM). Technische Universität Darmstadt, 2013.
- [237] GRIMM, O. *Polymere auf glatten Substraten in der Mikrosystemtechnik*. Fachpraktikum. Technische Universität Darmstadt, 2013.
- [238] HUMMEL, J. *Entwicklung eines miniaturisierten elektrothermisch aktuierten Ventils*. Masterarbeit. Technische Universität Darmstadt, 2013.
- [239] ALLEVATO, G.; KRAMER, A.; SCHÄFER, N.; TAMMEN, B. und TRAN, C. *Entwicklung einer integrierten Dehnungsmessung für elektrothermische Aktoren*. Praktische Entwicklungsmethodik III (PEM). Technische Universität Darmstadt, 2014.
- [240] HAMAD, E. *Optimising Efficiency of MEMS Actuators*. Wissenschaftlicher Gastaufenthalt zum Aufbau einer internationalen Kollaboration (DFG SCHL 532/10-1). Technische Universität Darmstadt, 2014.
- [241] THAQI, E. *Entwicklung eines Messaufbaus zur Prüfung der Eignung von Polymeren für elektrothermische Aktoren*. Bachelorarbeit. Technische Universität Darmstadt, 2014.
- [242] EL KHOURY, M. *Machbarkeitsstudie zur Integration elektrothermischer Polymeraktoren in Hardtags*. Studie. Technische Universität Darmstadt, 2015.
- [243] ISLAM, S. *Entwicklung feinwerktechnisch hergestellter elektrothermischer Aktoren auf Basis von PEEK-Folien*. Bachelorarbeit. Technische Universität Darmstadt, 2015.
- [244] SCHLEMMER, S. *Entwicklung eines elektrothermischen normal geschlossenen Linearschrittantriebs aus SU-8*. Bachelorarbeit. Technische Universität Darmstadt, 2015.

A Ergänzungen zu den Fertigungstechnologien am Institut EMK

Im folgenden Abschnitt werden einige Ergänzungen zu den im Hauptteil knapp dargestellten technologischen Möglichkeiten am Institut EMK gegeben. Zunächst wird die UV-(Tiefen)lithographie ausführlicher diskutiert, dann auf die physikalische Dampfphasenabscheidung eingegangen und abschließend das Nass- und Trockenätzen erläutert.

UV-Tiefenlithographie

Mit Hilfe der Photolithographie werden Strukturen in einem strahlungsempfindlichen Lack (Photoresist), mit dem das zu strukturierende Substrat beschichtet ist, erzeugt. Der zunächst flüssige Lack wird in der gewünschten Dicke auf das Substrat aufgebracht und im Softbake getrocknet. Die Bestrahlung mit UV-Licht aktiviert den Photoinitiator des Resists und verändert die Löslichkeit, wobei durch photochemische Prozesse im Resist die Löslichkeit der belichteten Bereiche im Fall von Positivresist erhöht wird und im Fall von Negativresist verringert wird. Die löslichen Bereiche werden in einem Entwicklerbad nasschemisch entfernt. Abbildung A.1 zeigt die typischen Schritte einer lithographischen Strukturierung. In dieser Arbeit wird die UV-Lithographie mit drei Lacksystemen für verschiedene Einsatzgebiete benutzt.

Belacken

Zu Beginn der Prozessierung wird der Lack in definierter Menge auf das Substrat dispensiert. Für Zielschichtdicken bis max. 100 µm wird der Lack **aufgeschleudert**: Durch schnelle Rotation des Wafers stellt sich eine zur Drehzahl proportionale Lackdicke ein. Üblicherweise wird der Lack zunächst bei geringer Drehzahl bis ca. 300 rpm verteilt und dann mit hoher Beschleunigung auf die Enddrehzahl gebracht, wodurch die überschüssige Lackmenge abgeschleudert und die Zieldicke erreicht wird. Die möglichen Schichtdicken sind dabei abhängig von der Viskosität des Materials. Durch zu langes Halten der Enddrehzahl kann es durch die Fliehkräfte in der nassen Schicht zu einer Lacküberhöhung im Randbereich des Substrats kommen. Die Drehzahl-Stufen und die Haltezeiten sind auf Lackschleuder und Resist anzupassen. Am Institut EMK stehen hierfür Belacker vom Typ SÜSS Delta 80 BM und LabSpin 6 BM zu Verfügung.

Für hohe Schichtdicken wird ein **Gießprozess** nach *Staab* verwendet: Die Zielschichtdicke wird über die dispensierte Lackmenge eingestellt. Durch manuelles Kippen, Schwenken und Verstreichen wird das Substrat flächig mit Lack benetzt. Ein nachfolgender Backschritt für eine Stunde bei ca. 60 °C unter Lösemittelatmosphäre lässt den Lack fließen und durch die Oberflächenspannung stellt sich eine homogene Lackdicke ein. *Staab* weist eine Schwankung der Schichtdicke um 15 % auf einem 4"-Substrat nach. Die Vorteile des Gießprozesses liegen in der Materialersparnis, das kein überschüssiger Lack abgeschleudert wird und in der Möglichkeit, vorstrukturierte Wafer mit großer Oberflächentopologie belacken zu können. An Strukturkanten treten beim Aufschleudern Lackabrisse auf, die eine flächige Bedeckung verhindern. Wird die Zielschichtdicke größer als die unterliegende Topologie gewählt, lassen sich auch stark vorstrukturierte Substrate belacken.

Softbake

Der nasse Lack wird durch Backen des Substrats auf einer Hotplate getrocknet. Die Backschritte bestehen aus einer oder mehreren Stufen, die mit programmierbaren Hotplates, bspw. vom Typ

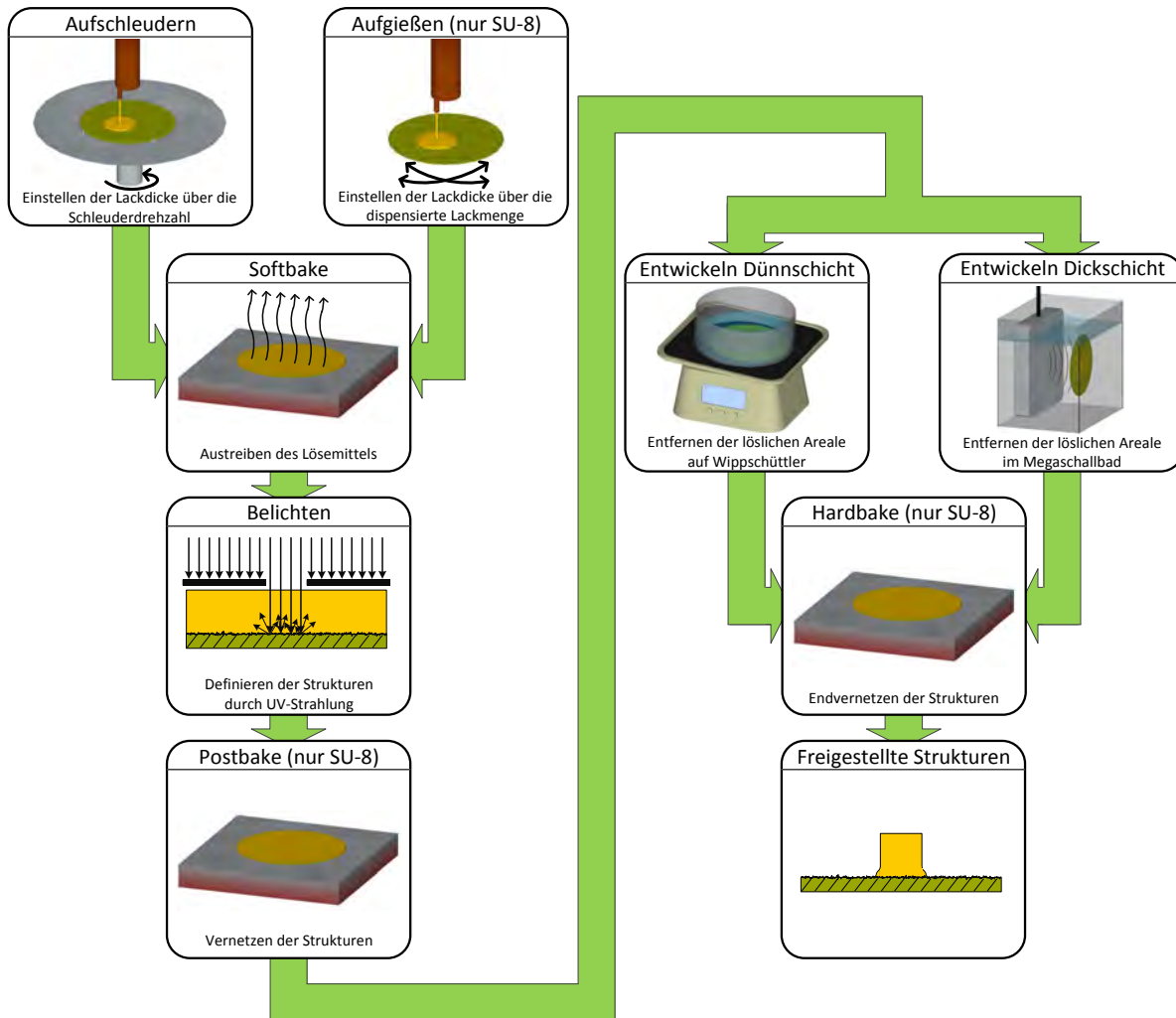


Abbildung A.1.: Prozessschritte der UV-Lithographie

Gestigkeit Präzitherm, automatisiert durchgeführt werden. Backzeiten oder Restlösemittelgehalte werden dabei entweder dem Datenblatt entnommen, oder in eigenen Versuchen, bspw. durch Wiegen der Lackschicht, experimentell bestimmt. Die typische Softbake-Temperatur beträgt 95 °C, was einen guten Kompromiss zwischen schnellem Austreiben des Lösemittels und geringer thermischer Zerstörung des Photoinitiators darstellt [67].

Belichten

Zur Definition der Mikrostrukturen wird eine Schattenmaske, die die lateralen Strukturdimensionen trägt, über dem Substrat justiert und für eine definierte Zeit einer hochparallelen UV-Strahlung ausgesetzt. So wird die Struktur der Maske in den Lack übertragen. Hierfür steht ein Mask Aligner vom Typ SÜSS MA-56 M mit einer Quecksilberdampflampe und verschiedenen Kantenfiltern zur Verfügung. Abbildung A.2 zeigt das gemessene Intensitätsspektrum der Lampe mit den drei ausgeprägte Spektrallinien bei 435,83 nm (g-line), 404,66 nm (h-line) und 365,16 nm (i-line). Unterschiedliche Lacksysteme sind für ausgewählte Peaks besonders geeignet, weshalb das Spektrum über vorhandene Kantenfilter beschnitten werden kann. Die Belichtungsintensitäten und Spektren betragen 22,8 mW/cm² für ghi-line, 10,0 mW/cm² für gh-line und 7,2 mW/cm² für i-line. Die Homogenität der Belichtung über die Waferfläche beträgt ca. ±10 %. Mit dem Lampenalter können

die absoluten und spektralen Intensitäten schwanken, weshalb diese in regelmäßigen Abständen zu prüfen ist.

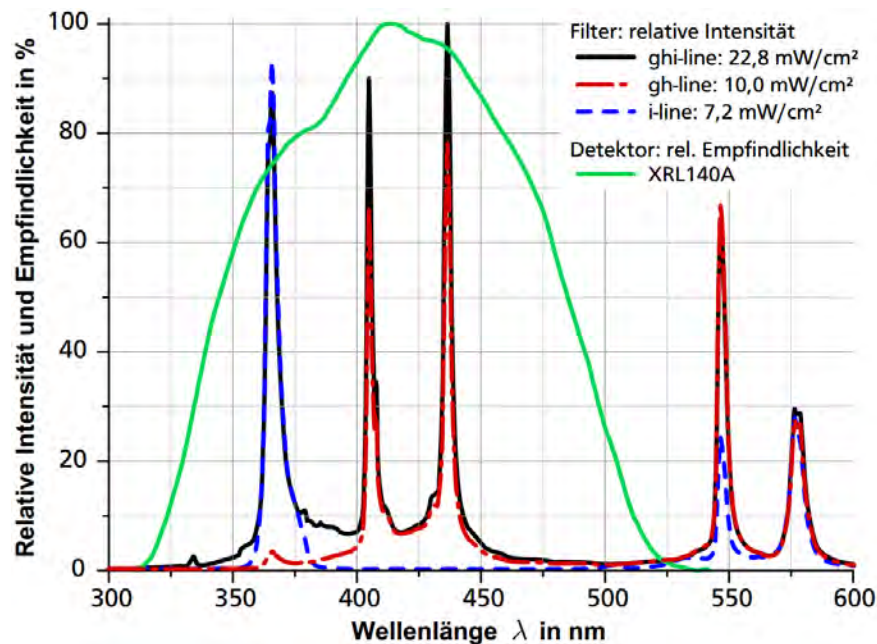


Abbildung A.2.: Intensitätsspektren für die Belichtung mit dem Mask Aligner SÜSS MA-56 M mit verschiedenen Kantenfiltern, gemessen mit dem Photometer ILT 1400 mit Detektor XRL140A nach Greiner [47]

Zur Vermeidung von Beugungseffekten an den Maskenkanten, die zur Reduzierung der lateralen Auflösung führen, wird die Kontaktbelichtung eingesetzt, bei der die Maske auf die Resistschicht aufgepresst wird. Da bedingt durch die rauen Substrate nur Strukturauflösungen bis in den unteren zweistelligen μm -Bereich möglich sind, bieten sich einige kostengünstige Maskenmaterialien als Alternativen zu den teuren Chrommasken an (siehe Tabelle A.1). Diese Polymerfilme werden an Glasträger angeheftet und in den Belichter eingesetzt. Abhängig von der gewünschten Strukturauflösung wird die Maske gewählt und die Belichtungszeit entsprechend der Transmission angepasst. In dieser Arbeit kommen überwiegend Emulsionsfilme vom Typ HI zum Einsatz, da die kleinsten Strukturabmessungen $20\ \mu\text{m}$ betragen.

Tabelle A.1.: Eigenschaften von Materialien für Lithographiemasken

Eigenschaft	Einheit	Emulsionsfilm Luxel	Emulsionsfilm HI	Chromplatte
Trägermaterial	–	PET-Folie	PET-Folie	Soda Lime Glas
Dicke	mm	0,1	0,18	3
Transmissionsfaktor	%	86,6	85,6	89,7
Auflösung	dpi	3658	bis 100.000	bis 200.000
Kleinste Strukturweite	μm	30 ± 20	20 ± 4	3 ± 1
Preis	–	Günstig	Mittel	Hoch

Bei der Belichtung gilt es zu beachten, dass ein gutes Ergebnis (klar aufgelöste, senkrechte Strukturanten) von der korrekt gewählten Belichtungs-dosis abhängen. Diese Dosis gilt es in Abhängigkeit des Lacksystems, der Lackdicke, der Reflektions-, sowie der Streueigenschaften der unterliegenden Schichten experimentell zu bestimmen. Ausgangspunkte liefern die Angaben in

den Datenblättern der Photolacke. Die Dosis wird dann über Belichtungsreihen und eine meist optische Prüfung der Strukturqualität ermittelt.

Entwickeln

Die Belichtung teilt die Lackschicht in Areale von hoher und niedriger chemischer Löslichkeit auf. Im Falle des epoxidbasierten UV-Negativresists SU-8 muss die chemische Stabilität nach der Belichtung durch einen Post-Exposure-Bake (Postbake) weiter gesteigert werden. Dies ist für die übrigen Lacksysteme in der Regel nicht der Fall. Die löslichen Areale werden in einem zum Lacksystem passenden Entwicklerbad entfernt.

Für **dünne Schichten** wird das Substrat in einem Becherglas auf einem Wippschüttler in einer Schwenkbewegung gehalten. So wird verbrauchter Entwickler weggeschwemmt und frische Lösung nachgeführt.

Bei **dicken Schichten** kommt vor allem in dünnen Gräben das Entwicklerbad zum Ruhen und wird durch das Schwenken allein nicht mehr ausgetauscht. Die Entwicklung findet durch reine Diffusion statt. Gerade in den Gräben ist eine vollständige Entwicklung aber meist für die Funktion der Schicht entscheidend. Die Entwicklung wird daher durch den Einsatz einer Sonosys Megaschallquelle mechanisch unterstützt. Durch die Anregung des Bades mit einer mechanischen Schwingung von 1 MHz entstehen Flüssigkeitswirbel in Gräben mit einer Breite $>0,6\text{ }\mu\text{m}$ [50], was die mechanische Abfuhr von verbrauchtem Entwickler wieder ermöglicht.

Der Prozess ist zeitgesteuert und hängt von der Lackdicke, vom Sättigungsgrad und ggf. vom Verdünnungsgrad des Entwicklers ab. Eine Kontrolle des Entwicklungsergebnisses ist daher immer nötig. Abschließend wird das Substrat abgespült und getrocknet.

Verwendete Lacksysteme und Standardprozesse

Im Rahmen dieser Arbeit kommen drei Lacksysteme zum Einsatz:

- Der Positivresist AZ® 9260 der Microchemicals GmbH ist ein sehr robuster Allround-Lack für Schichtdicken von $2\ldots30\text{ }\mu\text{m}$, der sich auf allen verfügbaren Substraten für das Nassätzen und als Galvanoform eignet [51]. Der Resist basiert auf dem Novolak-Harz, das in PGMEA gelöst ist, und zeichnet sich durch große Prozessfenster und eine lange Haltbarkeit prozessierter Schichten aus. Auf rauen Substraten werden Aspektverhältnisse bis 1:1 erreicht. Die mit ghi-line belichteten Bereiche werden in dem basischen Entwickler AZ400K gelöst, der in einer Verdünnung von 3:1 bis 4:1 verwendet wird. Das Strippen des Lacks erfolgt durch Abspülen mit Aceton. Tabelle A.2 zeigt die Prozessparameter des Standardprozesses für $30\text{ }\mu\text{m}$ Lackdicke.
- Der Photolack AZ® 125nXT der Microchemicals GmbH ist ein Negativresist auf Acryl-Polymer-Basis, der sich für Schichtdicken von $10\ldots400\text{ }\mu\text{m}$ eignet [52]. Die Acryl-Monomere vernetzen im UV-Bereich bei Wellenlängen von $380\ldots440\text{ nm}$ direkt und sind ausreichend stabil, so dass sich der Lack ohne weitere vernetzende Backschritte vornehmlich als Galvanoform für Schichtdicken $>50\text{ }\mu\text{m}$ verwenden lässt. Die Belichtung wird aufgrund des Absorptionsspektrums mit der gh-line vorgenommen, die Entwicklung geschieht in dem wasserbasierten Entwickler AZ® MIF 326. Für die Entfernung des Photolacks können entweder der Stripper Dimethylsulfoxid (DMSO), ein Acetonbad oder das Trockenätzen in einem Radikalverascher verwendet werden [53]. In dieser Arbeit wird der Lack mit $150\text{ }\mu\text{m}$ Dicke eingesetzt. Tabelle A.2 zeigt die zugehörigen Prozessparameter.

- Der epoxidbasierte UV-Negativresist EPON SU-8 ist ein mechanisch und thermisch hochstabil, weil bei hohen Prozesstemperaturen quervernetztes Material, das sich als Funktions- und Konstruktionswerkstoff eignet [54]. Nach der Initiation der Vernetzung durch Belichtung mit dem i-line-Spektrum ist ein vernetzender Postbake nötig, um die nötige Stabilität zur Entwicklung der Strukturen mit dem Lösemittel Propylen Glycol Methyl Ether Acetat (PGMEA) zu erreichen. In einem abschließenden Hardbake wird eine sehr starke Vernetzung erreicht. Auf den Werkstoff und die Abhängigkeit seiner Eigenschaften von der Prozessierung wird in Kapitel 4 ausführlich eingegangen. Die dort erläuterten Arbeiten basieren jedoch auf den von *Staab* entwickelten Fertigungsprozessen für SU-8 in den Dicken 20 µm und 300 µm. Tabelle A.2 zeigt die zugehörigen Prozessparameter.

Tabelle A.2.: Parameter der Standardprozesse für die Photolacke AZ® 9260, AZ® 125nXT und SU-8 auf rauen Substraten

Schritt	Parameter	Einheit	AZ® 9260	AZ® 125nXT	SU-8	
Belacken	Zieldicke	µm	30	150	20	300
	Lackmenge	ml	3,0	4,0	4,0	3,9
	Verfahren	–	Schleudern	Schleudern	Schleudern	Gießen
	Drehzahl	rpm	1500	1100	3500	–
Softbake	Einebnen (abgedeckt)	°C	95	135	95	60
		min	5	10	5	60
	Trocknen	°C	95	135	95	95
		min	35	15	55	540
	Abkühlen	min	0	60	0	60
Belichten	Dosis	J/cm ²	~3	~7	~0,4	~6
	Spektrum	–	ghi-line	gh-line	i-line	i-line
Postbake	Aufheizen	min	–	–	30	30
	Halten	°C	–	–	75	95
		min	–	–	30	30
	Abkühlen	min	–	–	30	30
Entwickeln	Medium Zeit	– min	AZ®400K ~20	AZ®MIF 326 ~10	PGMEA ~10	PGMEA ~30
Hardbake	Aufheizen	°C	–	–	140	150
		–	–	–	30 min	24 h
	Halten	min	–	–	30	–
	Abkühlen	–	–	–	30 min	24 h
Aspektverhältnis Säule		–	1:1 $\frac{2}{3}$	–	1:2	4:1
Aspektverhältnis Graben		–	3:1	–	1:3	2 $\frac{2}{3}$:1

Physikalische Gasphasenabscheidung

Aus der Gruppe der PVD-Verfahren stehen das Sputtern und das Aufdampfen zur Verfügung. Dies sind vakuumbasierte Verfahren, bei denen ein Materialreservoir in die Gasphase überführt und

auf das zu beschichtende Substrat gebracht wird. Mit beiden Verfahren werden Schichtdicken von wenigen Atomlagen bis hin zu ca. 200 nm abgeschieden.

Beim **Bedampfen** wird das Materialtarget z.B. durch einen Elektronenstrahl verdampft, steigt auf und kondensiert an der Substratoberfläche. Die Schichtdicke wird über die Änderung der Masse und damit der Resonanzfrequenz eines Schwingquarzes bestimmt. Auf der Anlage vom Typ Balzers BAK 600 lassen sich die Metalle Al, Cu, Cr, Ni, Ag, Ti und der Isolator Al_2O_3 aufbringen.

Beim **Sputtern** wird ein Edelgasplasma (z.B. mit Argon) erzeugt und die entstehenden Ionen durch ein äußeres elektrisches Feld auf das Target an der Kathode beschleunigt. Durch den mechanischen Einschlag werden Molekül-Ionen aus dem Targetmaterial herausgeschlagen und ihrerseits auf das an der Anode befindliche Substrat beschleunigt. Daher nennt sich das Verfahren auch Kathodenzerstäubung. Durch das mechanische Zerstäuben der Kathode tritt keine Entmischung auf und es lassen sich Legierungen abscheiden. Auch Isolatoren (z.B. Polymere) können gesputtert werden. Durch die kinetische Energie ist die Schichthaftung besser, als beim Bedampfen. Auf der am Institut vorhandenen Anlage von Alcatel können die Metalle Al, Cr, Cu und Ni, sowie beim Einsatz von HF-Sputtern der Isolator SiO_2 verarbeitet werden.

Nasschemisches Ätzen von Metallen

Zum Entfernen von Metallschichten im Mikrosystem stehen eine Reihe von Ätzmedien aus der Literatur zur Verfügung [205]. Die Substrate werden in Bechergläsern auf Wippschüttlern für eine definierte Zeit dem Ätzmedium ausgesetzt. Überätzungen, z.B. das Unterwandern von abgedeckten Arealen, werden durch rechtzeitiges Beenden des Prozesses vermieden. Die in Datenblättern verfügbaren Ätzraten sind meist nur Richtwerte, der Erfolg des Ätzschritts ist in der Regel optisch zu prüfen. Wichtig bei der Wahl des Ätzmediums ist die Selektivität zu anderen Metallen. Besonders Kupfer, das meist als Opferschichtmaterial bis zum letzten Prozessschritt im System bleiben muss, wird von vielen Medien angegriffen.

Tabelle A.3 zeigt die hier verwendeten Ätzmedien, die Zielmaterialien und Zusammensetzungen. Dabei gilt es zu beachten: TechniStrip Cr01 wird durch die Anwesenheit von Kupfer inhibiert. Eine alternative Chromätze auf Basis von Kaliumhexacyano(III)-Ferrate schafft Abhilfe, ist aber alkalisch und strippt Photolacke, wie bspw. AZ® 9260. Königswasser bietet die Möglichkeit, Nickel bei Raumtemperatur zu ätzen, ist aber nicht selektiv zu Kupfer.

In der Literatur ist das Nassätzen von Metallen gut untersucht, eine Übersicht mit Fokus auf die Mikrosystemtechnik findet sich bei *Williams et. al.* [209, 210].

Trockenätzen

Zur Substratreinigung, Oberflächenaktivierung und dem Entfernen von Photolacken stehen verschiedene trockene Plasmaprozesse zur Verfügung. Die Oberflächenaktivierung ist für die Galvanoformung wichtig, da die meisten Photolacke hydrophob sind und so keine Benetzung der Galvanoform durch den Elektrolyten stattfindet. Dies verhindert besonders bei engen Gräben das homogene Auffüllen mit Metall.

Im Reaktivradikalverascher vom Typ R3T muegge STP 2020 ist die Veraschung des hochstabilen Resists SU-8 möglich. In einem Argonplasma werden mit Hilfe von bis zu 3000 W Mikrowellenleistung Radikale der Prozessgase Sauerstoff, Tetrafluormethan und Stickstoff gebildet, die den Resist abtragen. Der Prozess kann bei Temperaturen bis zu 60 °C stattfinden und ist zeitgesteuert [211].

Tabelle A.3.: Zielmaterialien und Zusammensetzung der Ätzmedien für verschiedene Metalle

Bezeichnung	Material	Inhaltsstoff	Menge	Quelle
TechniStrip Cr01	Chrom	Ammoniumcernitrat	10,9 %	[206]
		Perchlorsäure	4,4 %	
		Deionisiertes Wasser	84,7 %	
Alternative Chromätze	Chrom	Kaliumhexacyanoferrat (III)	20 g	[207]
		Natriumhydroxid	10 g	
		Deionisiertes Wasser	100 g	
APDS	Kupfer	Ammoniumperoxodisulfat	285 g	[208]
		Ammoniaklösung 25 %	228 g	
		Deionisiertes Wasser	855 ml	
Königswasser	Nickel	Salzsäure	50 %	[209]
		Salpetersäure	17 %	
		Deionisiertes Wasser	33 %	

Die Entfernung von organischen Rückständen, sowie die Hydrophilisierung von Polymeren wird in einem RIE vom Typ Plasma Technology RIE80 durchgeführt. In dem Parallelplattenreaktor wird ein Sauerstoffplasma erzeugt und die Ionen auf das Substrat beschleunigt. Bei einer Mikrowellenleistung von 100 W führt eine Aktivierungszeit von 1 min zu einem guten Ergebnis.

Ebenfalls zur Hydrophilisierung, aber auch zum Aktivieren von Oberflächen für das Sauerstoff-Bonden dient ein Barrelreaktor vom Typ Diener Nano 6“. Hier wird ein Sauerstoffplasma erzeugt und Proben bei einer Mikrowellenleistung von 100 W für wenige Sekunden aktiviert. Das Sauerstoffplasma bricht die Wasserstoffbrückenbindungen an der Oberfläche von sauerstoffhaltigen Festkörpern, bspw. SiO₂ oder PDMS, auf und erlaubt das stoffschlüssige Verbinden zweier Materialien durch reines Fügen der Verbindungspartner [212].



B Physikalischen Grundlagen der elektro-thermo-mechanischen Wandlung

Im Folgenden werden die physikalischen Grundlagen der elektro-thermo-mechanischen Wandlungskette erläutert.

Joule'sche Wärmezeugung

Bereits im Jahre 1840 beschreibt James Prescott Joule, dass ein stromführender elektrischer Leiter durch ständige Wandlung thermische Energie erzeugt, die dem Leiter durch äußere thermische Randbedingungen entnommen wird. Die physikalische Ursache für die Wärmezeugung ist in elastischen Stößen der im elektrischen Leiter fließenden Elektronen zu finden, die die Gitterschwingungen im Leiter verstärken und so für eine Temperaturerhöhung sorgen. Im stationären Zustand entspricht der abgegebene Wärmestrom \dot{Q}_{Joule} der erzeugten elektrischen Leistung, wie Gleichung B.1 zeigt.

$$\dot{Q}_{\text{Joule}} = P_{\text{el}} = I^2 R = \frac{U^2}{R} \quad (\text{B.1})$$

Wird ein flächig verteilter Leiter von einem Strom durchflossen, müssen die Stromwärmeverluste für jedes Volumenelement anhand der Stromdichte J und dem spezifischen Widerstand $\rho(T)$ nach Gleichung B.2 berechnet werden.

$$\partial P(x) = \rho(T) J^2 \partial V(x) \quad (\text{B.2})$$

Die lokal entstehende Temperaturdifferenz stellt sich dann aus der im Volumenelement erzeugten Leistung, der beteiligten Oberfläche und den lokalen thermischen Randbedingungen ein. Hinzu kommt die Temperaturabhängigkeit des spezifischen Widerstands $\rho(T)$ als Rückwirkung der Umgebung auf die Wärmezeugung. Bei einer lateral ausgedehnten Heizergeometrie muss die Joule'sche Wärmezeugung also für jedes Volumenelement des Heizers einzeln betrachtet werden.

Wärmetransportmechanismen

Die Wärmetransportmechanismen bilden neben Eigenschaften der verwendeten Werkstoffe eine entscheidende Grundlage der Modellbildung für elektrothermische Mikroaktoren. Sie bewirken die Ausbildung des Temperaturfelds im geheizten Balken und beeinflussen damit direkt die Leistungsfähigkeit der Aktoren. Im Folgenden werden die physikalischen Mechanismen Konduktion, Konvektion und Wärmestrahlung erläutert. Die Betrachtung basiert auf den Arbeiten von *Eicher* [8] und *Staab* [10].

Konduktion

Unter Wärmeleitung versteht man den Energietransfer zwischen zwei Orten eines Körpers oder eines ruhenden Fluids, hervorgerufen durch einen Temperaturgradienten. Die physikalische Ursache sind Gitterschwingungen: Bei Orten hoher Temperatur weisen die Atome des Körpers eine hohe kinetische Energie auf, die sie durch Schwingung an angrenzende niederenergetischere Atome weitergeben. Die resultierende Wärmestromdichte \dot{q}_{leit} stellt sich dabei – gemäß dem zweiten

Hauptsatz der Thermodynamik – hin zur geringeren Temperatur ein und ist so dem negativen Temperaturgradienten proportional [213]. Dieser Transportmechanismus wurde bereits im Jahre 1822 von Jean Baptiste Joseph Fourier beschrieben und ist daher als Fourier-Gesetz bekannt.

$$\dot{q}_{\text{leit}}(x, t) = -\lambda \nabla T(x, t) \quad (\text{B.3})$$

Die Proportionalitätskonstante λ in Gleichung B.3 wird als thermische Leitfähigkeit bezeichnet. Sie ist eine charakteristische Materialeigenschaft des temperaturleitenden Mediums.

Konvektion

Anders als bei der Konduktion ist der Wärmeübergang bei der Konvektion mit einer Relativbewegung zwischen Körper und strömendem Fluid verbunden, man spricht auch von Wärmemitführung durch ein strömendes Fluid. Der Energietransport zwischen den Fluidmolekülen findet dabei dennoch durch Konduktion statt. Da zudem die Relativgeschwindigkeit des Fluids an der Körperoberfläche gegen null geht, ist Konvektion mit Konduktion verbunden. Man unterscheidet zwischen erzwungener Konvektion durch Fluidbewegung, bspw. durch ein Gebläse oder einen Lüfter, und freier Konvektion, die auf die Gravitation oder Dichteunterschiede zurückzuführen ist. Der Hauptunterschied liegt demnach darin, dass bei erzwungener Konvektion die externe Strömung bekannt ist, wogegen sie bei freier Konvektion aus den Konzentrations- oder Dichtefeldern abgeleitet werden muss. Die Komplexität freier Konvektion ist deutlich höher, was die mathematische Beschreibung nur für stark vereinfachte Fälle möglich macht. Auch dann ist eine Beschreibung häufig nur anhand von Ähnlichkeitsbetrachtungen mit Hilfe der charakteristischen Länge L aus der Nusselt-Zahl Nu möglich:

$$Nu = \frac{\alpha_{\text{konv}} L}{\lambda} \quad (\text{B.4})$$

Die Nusselt-Zahl ist proportional zum mittleren Konvektionskoeffizienten α_{konv} und kann für eine Reihe von Geometrien und Strömungsverhältnisse mittels empirischer Korrelationen bestimmt werden, was über weitere Ähnlichkeitskennzahlen, wie der Grashoff-Zahl, der Prandtl-Zahl und der Rayleigh-Zahl möglich ist [214]. Dies hängt jedoch von den thermophysikalischen Eigenschaften des Fluids, sowie der Geometrie, der Orientierung und der Temperatur der Oberfläche ab [215]. Der durch Konvektion verursachte Wärmestrom ergibt sich mit dem Konvektionskoeffizienten α_{konv} :

$$\dot{q}_{\text{konv}} = -\alpha_{\text{konv}}(T - T_{\infty}) \quad (\text{B.5})$$

Wärmestrahlung

Wärmestrahlung ist der dritte Wärmetransportmechanismus. Jeder Festkörper mit endlicher Temperatur emittiert über seine Oberfläche als grauer Strahler elektromagnetische Strahlung, die sich nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz als Emission eines Wärmestroms modellieren lässt. Dabei wird der emittierte Wärmestrom mit dem materialabhängigen Emissionsgrad $0 < \epsilon(T) < 1$ gewichtet. Mit der Boltzmann-Konstante $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ und der Bezugstemperatur T_{∞} ergibt sich Gleichung B.6. Analog zu Konduktion und Konvektion lässt sich durch Umformen der Wärmeübergangskoeffizient $\alpha_{\text{rad}}(T)$ definieren:

$$\dot{q}_{\text{rad}} = \epsilon(T) \sigma (T^4 - T_{\infty}^4) \quad (\text{B.6})$$

$$= \alpha_{\text{rad}}(T) (T - T_{\infty}) \quad (\text{B.7})$$

mit

$$\alpha_{\text{rad}}(T) = \epsilon(T) \sigma (T^2 + T_{\infty}^2)(T + T_{\infty}) \quad (\text{B.8})$$

Diese Form der Wärmeübertragung ist als einzige nicht an ein umgebendes Medium gebunden und tritt daher auch im Vakuum auf. In der Praxis ist es bei Normaldruck nicht möglich, aber auch nicht nötig, Wärmestrahlung und Konvektion zu trennen, besonders bei experimenteller Bestimmung des Übergangskoeffizienten [154]. Die Wärmestrahlung wird daher im weiteren Verlauf der Arbeit nicht als eigener Transportmechanismus berücksichtigt.

Thermo-Mechanische Wechselwirkung

Bei Festkörpern beobachtet man eine Änderung des Volumens, hervorgerufen durch eine Temperaturänderung. Die physikalische Ursache ist das unsymmetrische Wechselwirkungspotential zwischen den Atomen des Körpers. Aufgrund dieser Asymmetrie wandern die Schwingungsmittelpunkte der Atome in ihrem Gitter bei steigender Temperatur hin zu größeren Abständen der Atome. Diese Gestaltänderung wird Wärmedehnung genannt. Die hier relevante relative Längenänderung $\partial l/l$ eines Balkens wird durch ihre Proportionalitätskonstante α mit der Temperaturänderung δT in Gleichung B.9 beschrieben. Aus der Lösung dieser Differentialgleichung ergibt sich die exponentielle Längenänderung nach Gleichung B.10, die in der Regel durch die ersten beiden Glieder ihrer Taylorreihenentwicklung approximiert wird [216]. Für die Längenänderung folgt Gleichung B.11.

$$\alpha = \frac{1}{l} \frac{\partial l}{\partial T} \quad (\text{B.9})$$

$$l(T) = l(T_0) \exp(\alpha \Delta T) \approx l_0 (1 + \alpha \Delta T) \quad (\text{B.10})$$

$$\Delta l \approx l_0 \alpha \Delta T \quad (\text{B.11})$$

Besonders bei Körpern mit geringer thermischer Leitfähigkeit bilden sich in alle Raumrichtungen Temperaturgradienten aus. Die Temperatur ist damit vom betrachteten Ort anhängig, weshalb auch die thermische Dehnung verteilt betrachtet werden muss.



C Leistungsbereiche optimierter elektrothermischer Mikroaktoren

Im folgenden Abschnitt wird eine Analyse des statischen und dynamischen Aktorverhaltens durchgeführt und die Leistungsdaten der Mikroaktoren auf dem Bauraum 15 mm x 10 mm x 500 µm simuliert.

Analyse und Entwurf der Mikroaktoren

Zum gezielten Entwurf der Mikroaktoren ist es wichtig, ein Verständnis für die Pseudobimorph-Geometrie und den Einfluss der Geometrie auf das Aktorverhalten zu entwickeln. Im Fokus stehen dabei die Abmessungen des Dehnungskörpers, über den sich die mechanischen Kenngrößen Leerlaufauslenkung und Blockierkraft der Mikroaktoren bestimmen. Durch das gewonnene Verständnis für die Geometrieabhängigkeiten kann eine gezielte Auslegung erfolgen. In Abbildung C.1 ist die Parametrisierung des Pseudobimorphs dargestellt.

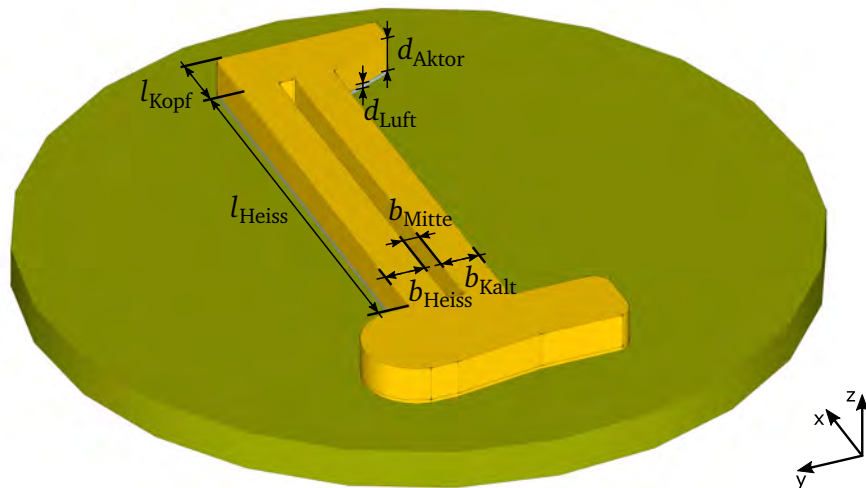


Abbildung C.1.: Parametrisierung des Pseudobimorph-Aktors

Statisches Mikroaktorverhalten

Zunächst wird ein einfaches analytisches Modell herangezogen, um den qualitativen Einfluss der Aktorgeometrie auf das Verhalten einzuschätzen. Durch das gewonnene Verständnis für die Geometrieabhängigkeiten erfolgt mit Hilfe des FEM-Modells eine gezielte Aktoroptimierung.

Analytisches Mikroaktormodell

Ein elastomechanisches analytisches Modell für den elektrothermischen Pseudobimorph wird von Qiu [37] für Aktoren aus Silizium vorgestellt und von Deder [217] auf polymere Mikroaktoren übertragen. Das Modell gilt für Geometrien mit konstanten Balkenquerschnitten und vernachlässigt thermische Gradienten, sowie das ungewollte Aufheizen des kalten Balkens durch den mittleren Luftspalt, was zu einer Reduzierung der Auslenkung führt. Das Modell ist jedoch einfach genug, um die qualitativen Geometrieinflüsse gut zu erfassen und wird im Folgenden dafür herangezogen.

Auf Basis der linearen Balkentheorie wird der Aktor freigeschnitten und die Momenten- und Kräftegleichgewichte zwischen heißem und kaltem Balken aufgestellt. Annahme hierfür ist, dass das Verbindungsstück zwischen den Balken, der Aktorkopf, unendlich steif ist, und die Kräfte zwischen den Balken ideal überträgt. Es ergibt sich Gleichung C.1 für die Leerlaufauslenkungen ξ_{Leer} , sowie Gleichung C.2 für die Blockierkräfte F_{Block} . Die Geometrievariablen sind nach Abbildung C.1 gewählt.

$$\xi_{\text{Leer}} = \alpha_{\text{SU-8}} \Delta T \frac{3 l_{\text{Heiss}}^2}{13 b_{\text{Heiss}}} \quad (\text{C.1})$$

$$F_{\text{Block}} = \alpha_{\text{SU-8}} \Delta T \frac{3 E_{\text{SU-8}} d_{\text{Aktor}} b_{\text{Heiss}}}{8 l_{\text{Heiss}}} \quad (\text{C.2})$$

Für die Geometrieinflüsse folgt:

$$\xi_{\text{Leer}} \sim l_{\text{Heiss}}^2 \quad (\text{C.3})$$

$$\sim \frac{1}{b_{\text{Heiss}}} \quad (\text{C.4})$$

und

$$F_{\text{Block}} \sim E_{\text{SU-8}} \quad (\text{C.5})$$

$$\sim d_{\text{Aktor}} \quad (\text{C.6})$$

$$\sim b_{\text{Heiss}} \quad (\text{C.7})$$

$$\sim \frac{1}{l_{\text{Heiss}}} \quad (\text{C.8})$$

Geometrieanalyse mit Hilfe des numerischen Modells

Das analytische Modell zeigt die Abhängigkeiten der Geometrie aufgrund der Vereinfachungen nur für die Länge und die Breite des geheizten Balkens. Mit Hilfe des numerischen Modells wird der Einfluss der übrigen Parameter, Luftspalt, Mittenabstand und Schichtdicke ergänzt. Außerdem wird untersucht, ob es ein optimales Aspektverhältnis, Verhältnis aus Aktorlänge zu -breite, für Pseudobimorph-Aktoren gibt. Dabei stellen $d_{\text{Luft}} = 15 \mu\text{m}$, $d_{\text{Aktor}} = 100 \mu\text{m}$ und $b_{\text{Luft}} = 150 \mu\text{m}$ die technologischen Untergrenzen der Aktordimensionierung dar. Ausgehend von diesen Grenzen werden die Parameter schrittweise erhöht.

Zur Beurteilung des Aktorverhaltens dienen zwei Optimierungskriterien. Die These ist, dass die Geometrie des Dehnungskörpers für einen gegebenen Weg und eine möglichst hohe Kraft anders optimiert werden muss, als bei gegebener Kraft und möglichst hohem Weg. In die Optimierungskriterien gehen die Grundfläche des Aktors A_{Aktor} , die maximale Betriebstemperatur T_{Max} , die mittlere im geheizten Balken erreichte Temperatur T_{MW} , die Leerlaufauslenkung ξ_{Leer} und die Blockierkraft F_{Block} ein. Es ergeben sich die Kriterien nach den Gleichungen C.9 und C.10.

$$\Psi_{\xi} = \frac{\xi_{\text{Leer}} T_{\text{MW}}}{A_{\text{Aktor}} T_{\text{Max}}} \quad (\text{C.9})$$

$$\Psi_F = \frac{F_{\text{Block}} T_{\text{MW}}}{A_{\text{Aktor}} T_{\text{Max}}} \quad (\text{C.10})$$

Ziel ist es, bei gegebener maximaler Betriebstemperatur eine möglichst hohe mittlere Temperatur im geheizten Balken zu erzielen, dabei eine kleine Grundfläche einzunehmen und die entsprechende mechanische Zielgröße zu maximieren.

Für diese rein numerische Untersuchung wird das vereinfachte FEM-Modell nach Kapitel 6.2.4 herangezogen. Die Unterseite des heißen Balkens wird auf eine konstante Temperatur von 113,4 °C gesetzt und die mechanischen Eigenschaften Leerlaufauslenkung und Blockierkraft bestimmt. Mit der Aktorgeometrie und der mittleren Balkentemperatur berechnen sich die Optimierungskriterien. Um die Optimierungskriterien besser fassbar zu machen, werden die berechneten Werte auf die Referenzgeometrie normiert, die Leistungsfähigkeit einer Aktorgeometrie also in Prozent der Referenzgeometrie angegeben.

Der Einfluss von **Luftspalt, Mittenabstand und Schichtdicke** auf das Aktorverhalten wird nachfolgend untersucht und mit Hilfe eines Versuchsplans nach Kleppmann [132] systematisiert: Die Dicke des Luftspalts d_{Luft} , die Dicke des Aktors d_{Aktor} und die Breite des Mittenabstands b_{Luft} werden mit den in Tabelle C.1 aufgeführten Faktorstufen gewählt, die Länge und die Breite entsprechen dem Referenzaktor und werden nicht variiert, da keine Wechselwirkung zu erwarten ist.

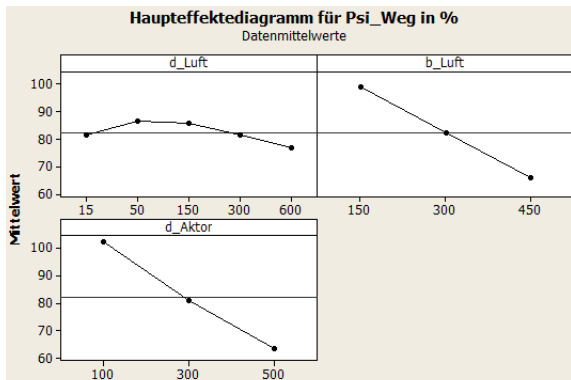
Tabelle C.1.: Parameter zur numerischen Untersuchung des Aktorverhaltens

Parameter	Wert in μm
d_{Luft}	15, 50, 150, 300, 600
d_{Aktor}	100, 300, 500
b_{Luft}	150, 300, 450

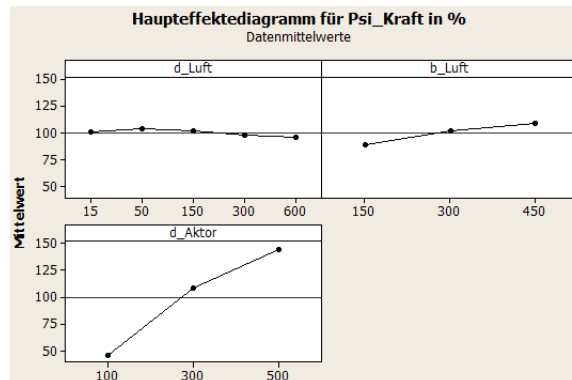
Über die Haupteffekte und Wechselwirkungen, lassen sich Einflüsse der Geometrie auf das Aktorverhalten und Querabhängigkeiten zwischen den Parametern erkennen. Abbildung C.2 zeigt die Haupteffekt und Wechselwirkungsdiagramme für beide Optimierungskriterien nach den Gleichungen C.9 und C.10. Sind die dargestellten Kurven parallel, beeinflussen sie sich nicht gegenseitig. Die Skalierung der Y-Achsen entspricht dem normierten Optimierungskriterium in %.

Die Wechselwirkungsdiagramme in Abbildung C.2c) und d) zeigen in guter Näherung parallele Kurvenverläufe. Lediglich bei Mittenabstand und Aktordicke ist eine Wechselwirkung sichtbar. Dies zeigt sich besonders im Hinblick auf die Leerlaufauslenkung in Abbildung C.2c). Bei kleinstem Mittenabstand b_{Luft} ist die Abnahme der Auslenkung mit der Aktordicke stärker als bei großem Abstand. Dies entspricht dem Aspektverhältnis des Luftvolumens in der Aktormitte und zeigt, dass thermisches Übersprechen das Aktorverhalten verschlechtert. Auffällig ist weiterhin die Abhängigkeit des Aktorverhaltens von der Luftspaltdicke in Abbildung C.2a). Für $d_{\text{Luft}} = 100 \mu\text{m}$ weist diese ein Maximum auf. Dies erklärt sich über die abnehmende thermische Leitfähigkeit des Luftspalts, die zunächst für eine bessere Temperaturverteilung im geheizten Balken führt, dann aber durch verstärktes thermisches Übersprechen eine Erwärmung des kalten Balken und damit zu einer Verschlechterung des Aktorverhaltens führt. Die in Abbildung C.2c) sichtbare, leichte Wechselwirkung zwischen Dicke des Luftspalts und Breite des Mittenabstands bestätigen dies. Die Beeinflussung der übrigen Parameter untereinander ist vernachlässigbar. Sie können voneinander unabhängig gewählt werden.

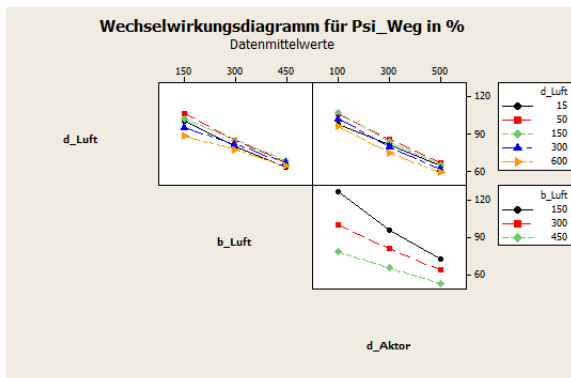
Anhand der Haupteffekte in Abbildung C.2a) und b) zeigen sich die Geometrieinflüsse auf das Aktorverhalten: Ein geringer Mittenabstand verbessert das Übertragungsverhalten und damit die Leerlaufauslenkung des Pseudobimorphs trotz des thermischen Übersprechens. Der Einfluss des



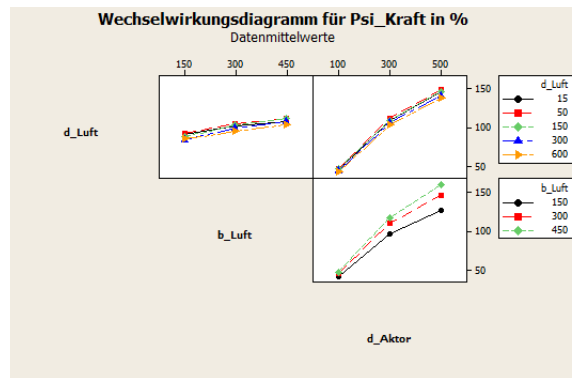
a)



b)



c)



d)

Abbildung C.2.: Quantisierung der Geometrieinflüsse auf das Aktorverhalten, dargestellt an zwei Optimierungskriterien: Haupteffekte (a) und Wechselwirkungen (c), optimiert für hohe Leerlaufauslenkung nach Gleichung C.9; Haupteffekte (b) und Wechselwirkungen (d), optimiert für hohe Blockierkraft nach Gleichung C.10

Mittenabstands auf die Blockierkraft ist dagegen gering. Die Aktordicke ist aufgrund der reduzierten Eigensteifigkeit für die Leerlaufauslenkung besser, eine größere Schichtdicke führt dagegen durch die größere Stirnfläche der Balken zu einer höheren Blockierkraft.

Das **Aspektverhältnis** der Aktoren, die Relation von Aktorbreite und -länge, wird im nächsten Schritt untersucht. Die Referenzgeometrie wird hierfür in ihrer Länge variiert, um Aspektverhältnisse von 1:15 bis 15:1 zu erreichen. Abbildung C.3 zeigt die Verläufe der beiden Optimierungskriterien Ψ_{ξ} und Ψ_F in Abhängigkeit des Aspektverhältnisses.

Wie erwartet verbessert sich das Aktorverhalten bezüglich der Auslenkung für kleine Aspektverhältnisse, die Kraft erhöht sich für Aktoren mit großem Aspektverhältnis. Dabei fällt auf, dass sich die Kraft durch das Aspektverhältnis um Größenordnungen besser steigern lässt, als die Auslenkung. Für die Blockierkraft ergibt sich ein Optimum bei einem Aspektverhältnis von 5:1, für die Auslenkung kann kein Optimum gefunden werden. Die beste Gesamtleistung der Aktoren ergibt sich für Aspektverhältnisse von 1:2 und 1:1, was dem starken Anstieg der Kraft zuzuschreiben ist.

Auf Basis dieser Betrachtungen kann der Entwurf der Mikroaktoren erfolgen und ihre Leistungsfähigkeit auf dem betrachteten Bauraum abgeschätzt werden.

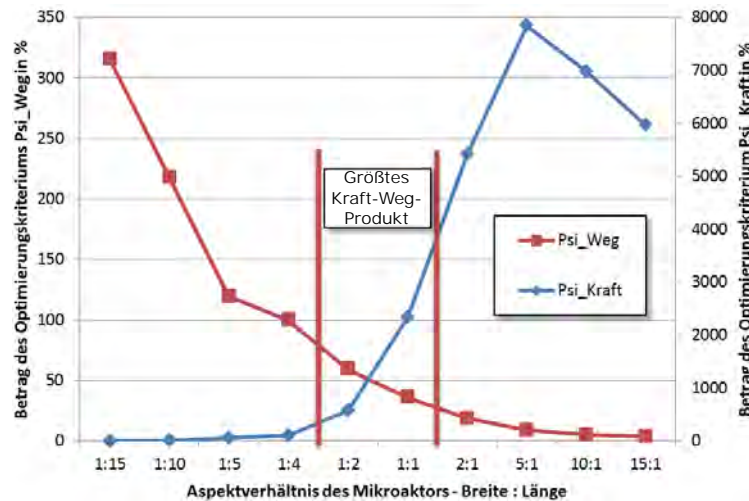


Abbildung C.3.: Verläufe der normierten Optimierungskriterien Ψ_{ξ} (rot) und Ψ_F (blau) in Abhängigkeit des Aspektverhältnisses (Breite:Länge)

Aktorentwurf: Leistungsfähigkeit der Mikroaktoren

Im Folgenden werden die Mikroaktoren ausgelegt und ihre Leistungsfähigkeit auf dem für diese Arbeit festgelegten Bauraum von 15 mm x 10 mm x 500 μm gezeigt. Die **Bereiche von Kraft und Auslenkung** der Mikroaktoren werden auf Basis der Untersuchungen in Kapitel C mit dem vereinfachten numerischen Modell bei der maximalen Aktortemperatur von 113,4 °C simuliert. Gesucht sind die maximal erreichbaren Auslenkungen und Kräfte von Aktoren an der Untergrenze der Fertigbarkeit und an der Obergrenze des Bauraums. Dies resultiert in je zwei auf Kraft oder Auslenkung optimierten Aktorgeometrien. Entsprechend der obigen Ergebnisse zu Dynamik und Aktorverhalten in Verbindung mit der Aktordicke, werden die Grenzwerte von Kraft und Auslenkung für die Dicken 100, 300 und 500 μm bestimmt.

Die kleinsten Aktorabmessungen ergeben sich aus den Grenzen der Fertigung und dem im Kapitel 6.2.2 ausgewählten einfach mäandrierten Heizerpattern. Die Breite des Mittenabstands b_{Luft} in der Aktormitte wird immer minimal gewählt. Wegen der Grenzen der lithographischen Strukturierung ergibt sich $b_{\text{LuftMin}} = 150 \mu\text{m}$. Die minimale Länge eines vollständigen Heizerpatterns folgt aus der Leiterbahnbreite von 20 μm zu $l_{\text{HeissMin}} = 160 \mu\text{m}$, was der kleinstmöglichen Aktorlänge entspricht. Die minimale Balkenbreite ergibt sich aus dem kleinsten Heizerpattern zu $b_{\text{HeissMin}} = 180 \mu\text{m}$. Dies resultiert in Geometrie I für die maximale Auslenkung bei minimalem Bauraum. Für die Grenzen der Kräfte wird das Aspektverhältnis der Geometrie, wie in Kapitel C gezeigt, auf 5:1 festgelegt, die Aktorlänge bleibt bei $l_{\text{HeissMin}} = 160 \mu\text{m}$. Dies resultiert in Geometrie II für die maximale Kraft bei minimalem Bauraum. Die Maximalwerte für Aktorlänge und -breite ergeben sich aus den Grenzen des Bauraums. Aus der minimalen Balkenbreite von $b_{\text{LuftMin}} = 150 \mu\text{m}$ und der Grenze des Bauraums von 15000 μm folgt Geometrie III für die maximal erreichbare Auslenkung. Mit dem Aspektverhältnis von 5:1 und der maximalen Breite des Bauraums von 10000 μm ergibt sich Geometrie IV für die maximal erreichbare Kraft. Tabelle C.2 zeigt die Abmessungen und die zugehörigen zu simulierenden Kennwerte. Daraus ergeben sich die Bereiche der Leistungsfähigkeit von elektrothermischen Mikroaktoren für die jeweiligen Schichtdicken in Tabelle C.3. Die Bereiche sind in Abbildung C.4 noch einmal graphisch dargestellt.

Tabelle C.2.: Aktorgeometrien zur Bestimmung der Grenzen von Kraft und Auslenkung

für Grenzwert	Geometrievarianten			
	I	II	III	IV
	ξ_{Min}	F_{Min}	ξ_{Max}	F_{Max}
b_{Luft} in μm	150	150	150	150
b_{Heiss} in μm	180	325	180	4925
l_{Heiss} in μm	160	160	15000	2000

Tabelle C.3.: Grenzen von Kraft und Auslenkung mit Geometrien aus Tabelle C.2 für typische Schichtdicken

Aktordicke in μm	ξ_{Min} in μm	F_{Min} in mN	ξ_{Max} in μm	F_{Max} in mN
100	2,9	59,5	1361,2	319,0
300	1,8	138,2	1011,7	944,2
500	1,4	186,7	737,8	1705,4

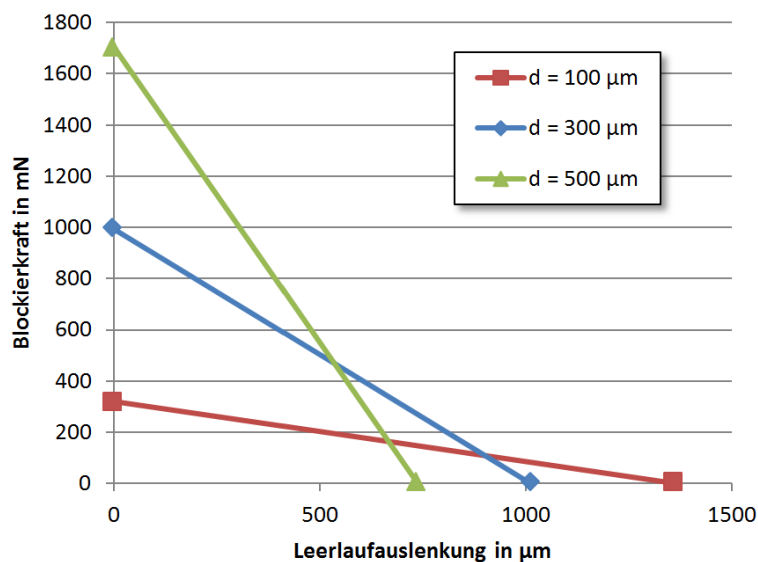


Abbildung C.4.: Obergrenzen von Kraft und Auslenkung der Mikroaktoren für die typischen Aktordicken von 100 μm , 300 μm und 500 μm

D Lithographiemasken

In diesem Teil des Anhangs werden die Lithographiemasken der unterschiedlichen Mikrosysteme und Proben aufgeführt:

- Schulterstäbe und Zugproben zur Bestimmung der Glastemperatur, des Temperaturkoeffizienten des spez. Widerstands von Nickel und des Emissionskoeffizienten
- Intrinsische Spannungen
- Intrinsisch vorgespannte Strukturen
- Spezifischer Widerstand von galvanisch abgeschiedenem Nickel
- Elektrothermische Mikroaktoren In-Plane
- Haptisches Display

Schulterstäbe und Zugproben

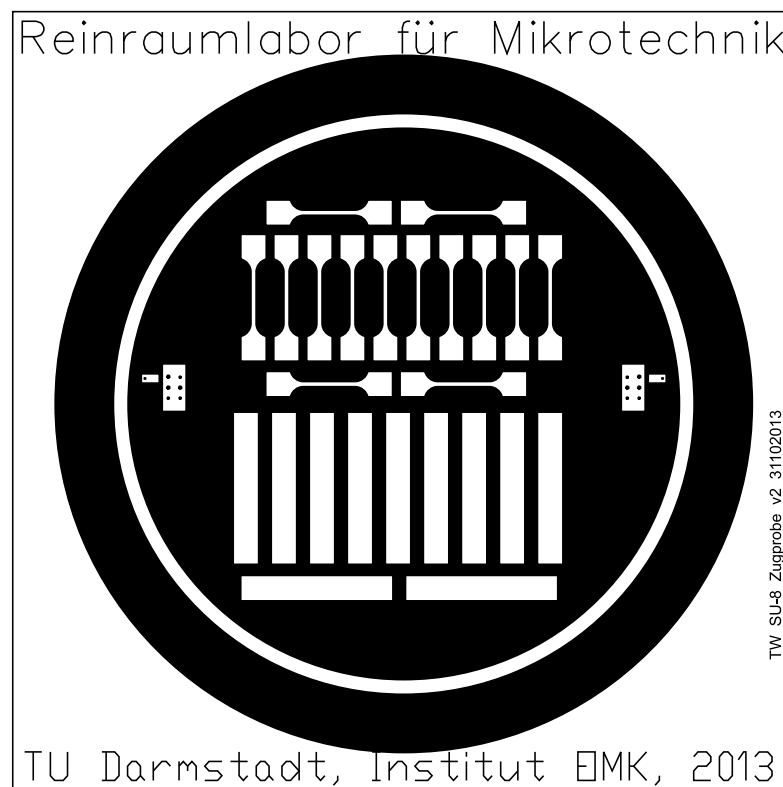


Abbildung D.1.: Schulterstäbe und Zugproben 1/1

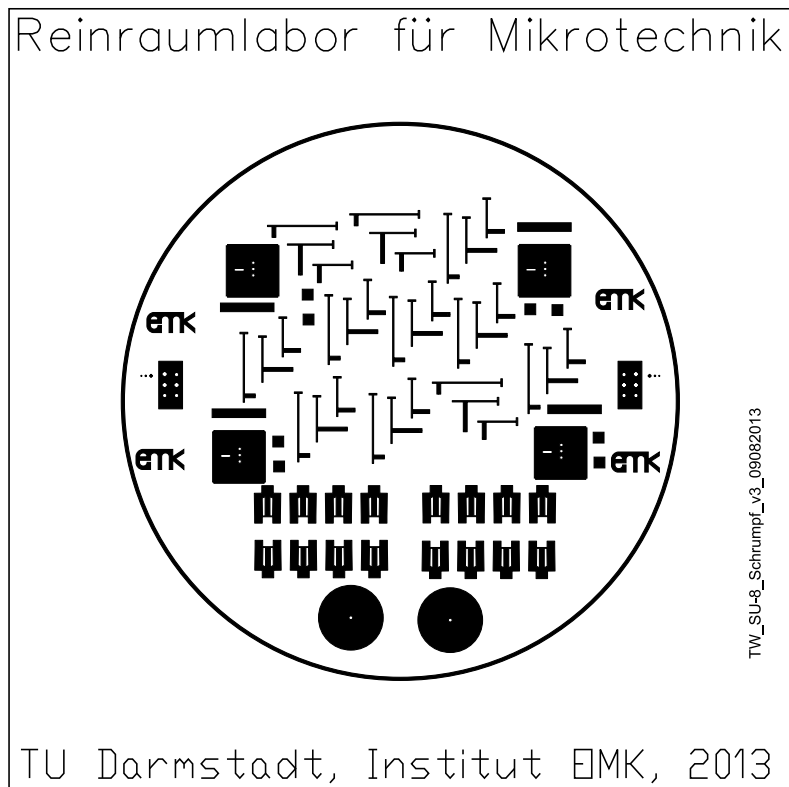


Abbildung D.2.: Bestimmung intrinsischer Spannungen 1/4: Opferschicht

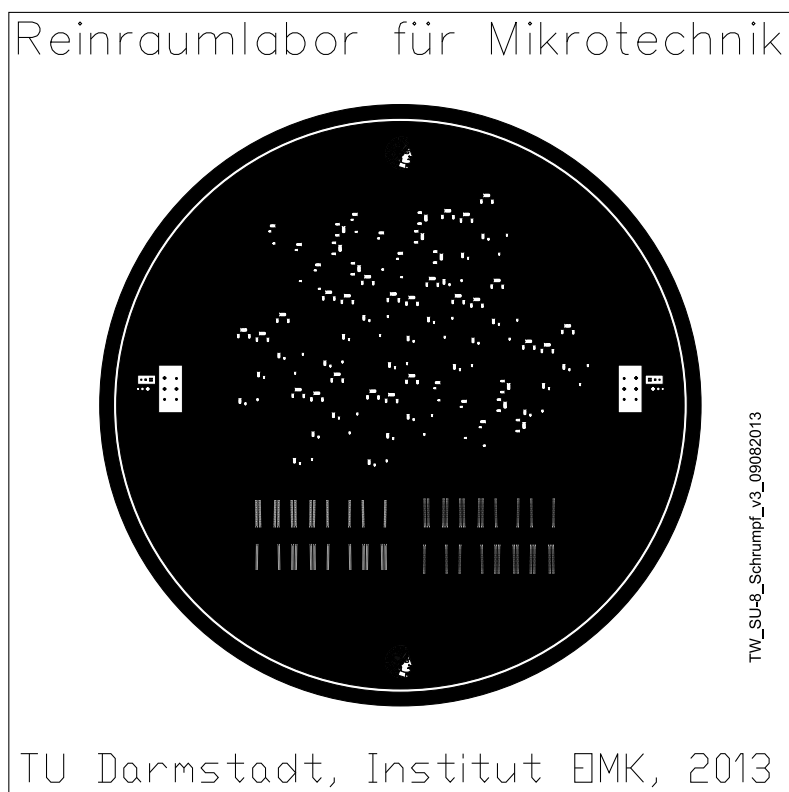


Abbildung D.3.: Bestimmung intrinsischer Spannungen 2/4: Heizmäander

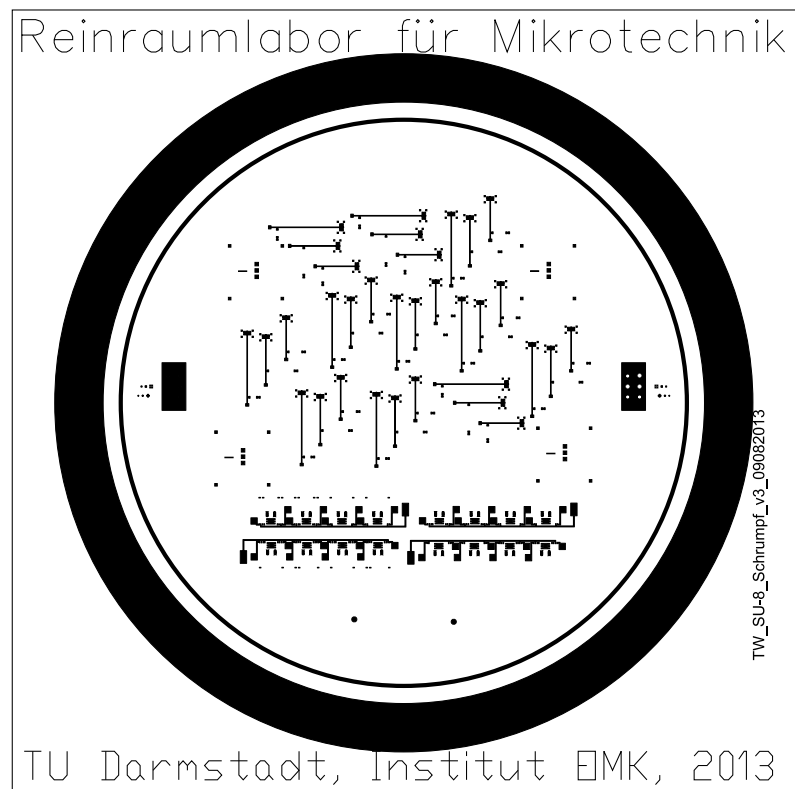


Abbildung D.4.: Bestimmung intrinsischer Spannungen 3/4: Leiterbahnen

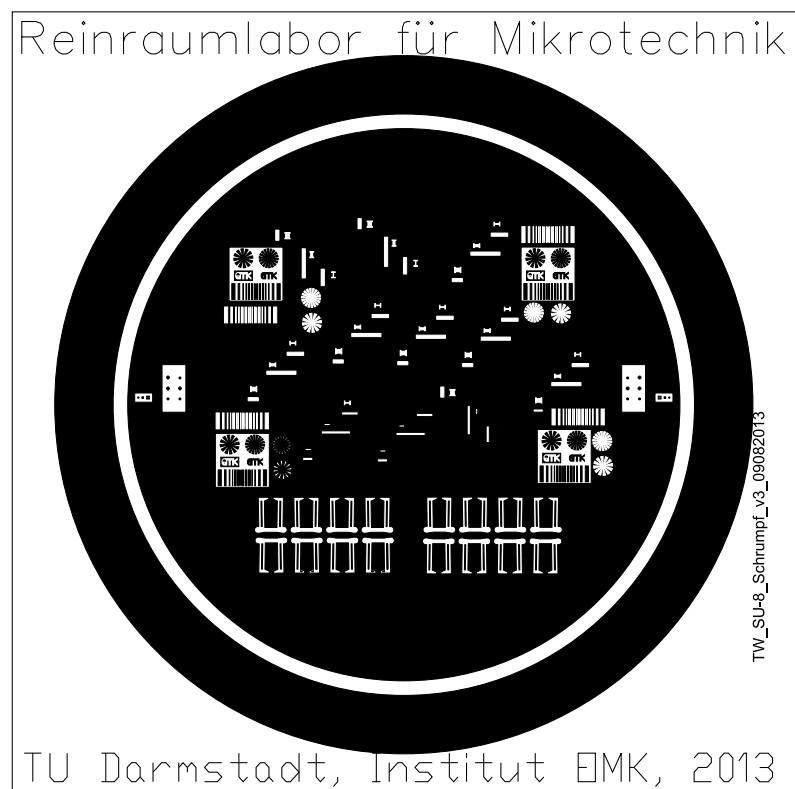


Abbildung D.5.: Bestimmung intrinsischer Spannungen 4/4: Proben

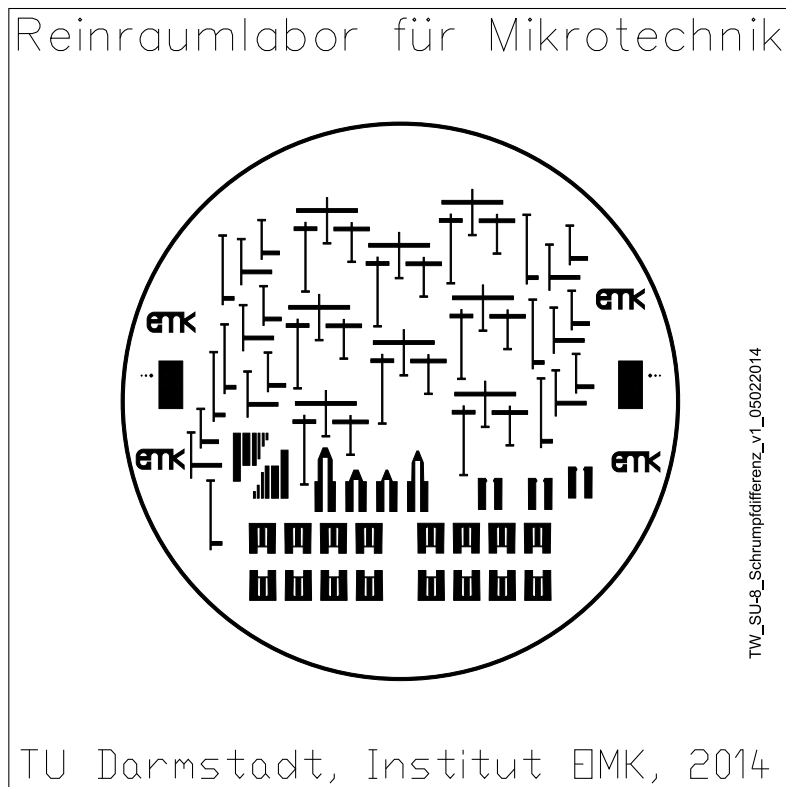


Abbildung D.6.: Intrinsisch vorgespannte Strukturen 1/5: Opferschicht

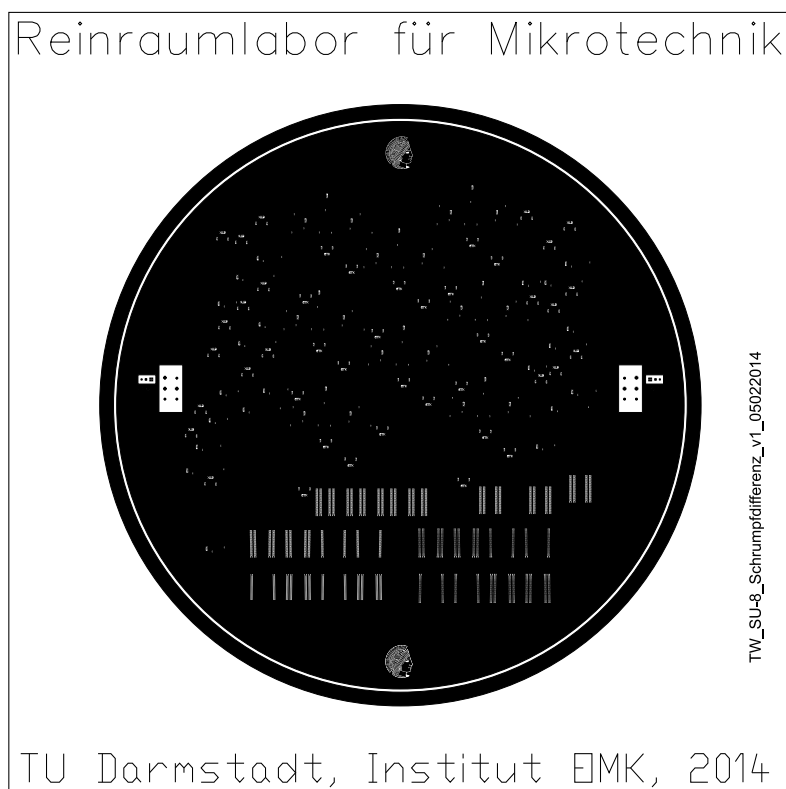


Abbildung D.7.: Intrinsisch vorgespannte Strukturen 2/5: Heizer

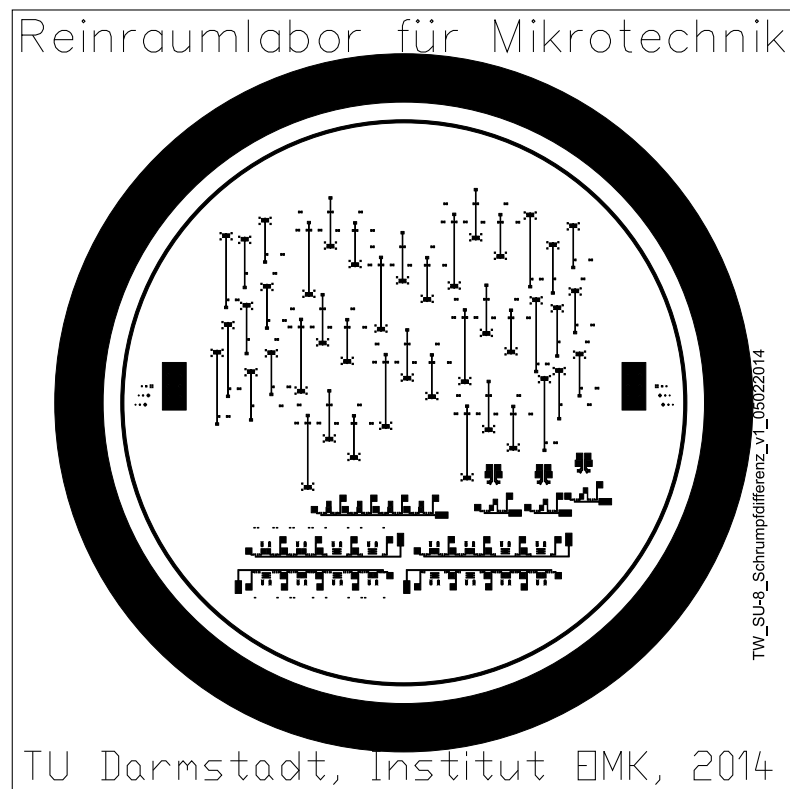


Abbildung D.8.: Intrinsisch vorgespannte Strukturen 3/5: Leiterbahnen

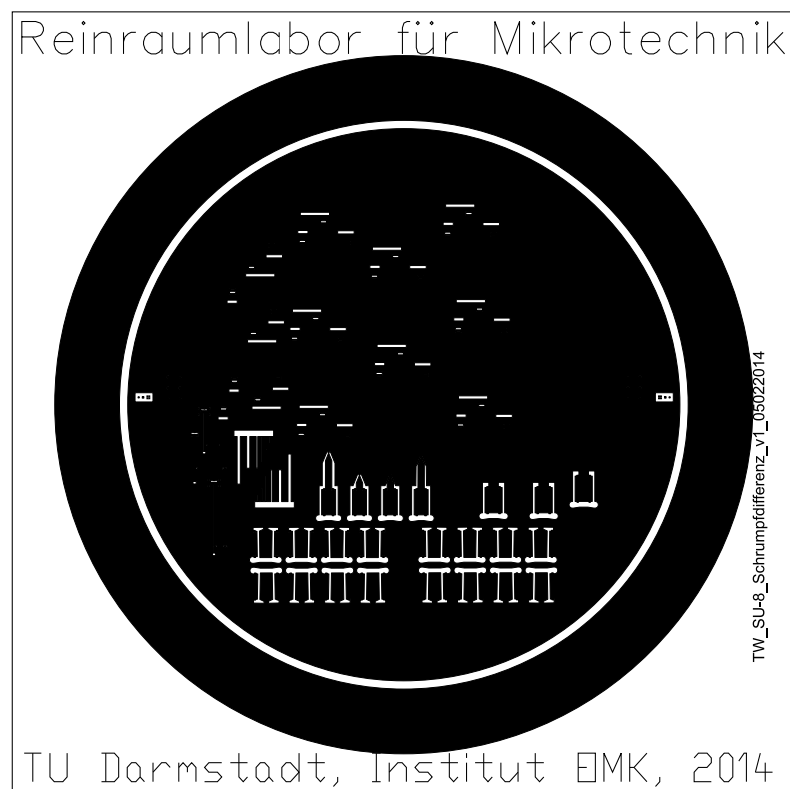


Abbildung D.9.: Intrinsisch vorgespannte Strukturen 4/5: Proben I

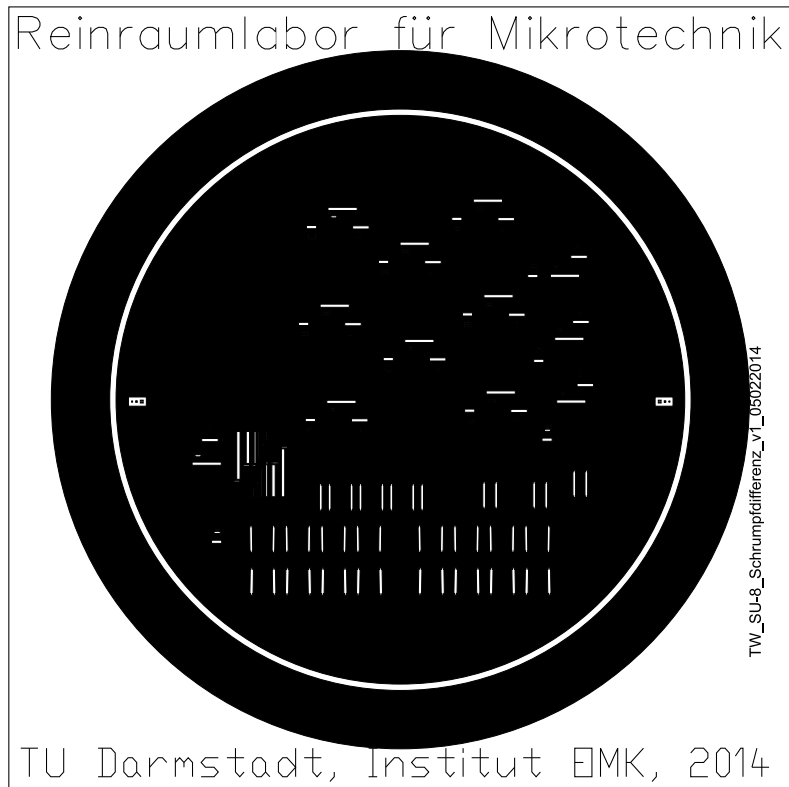


Abbildung D.10.: Intrinsisch vorgespannte Strukturen 5/5: Proben II

Spezifischer Widerstand von galvanisch abgeschiedenem Nickel

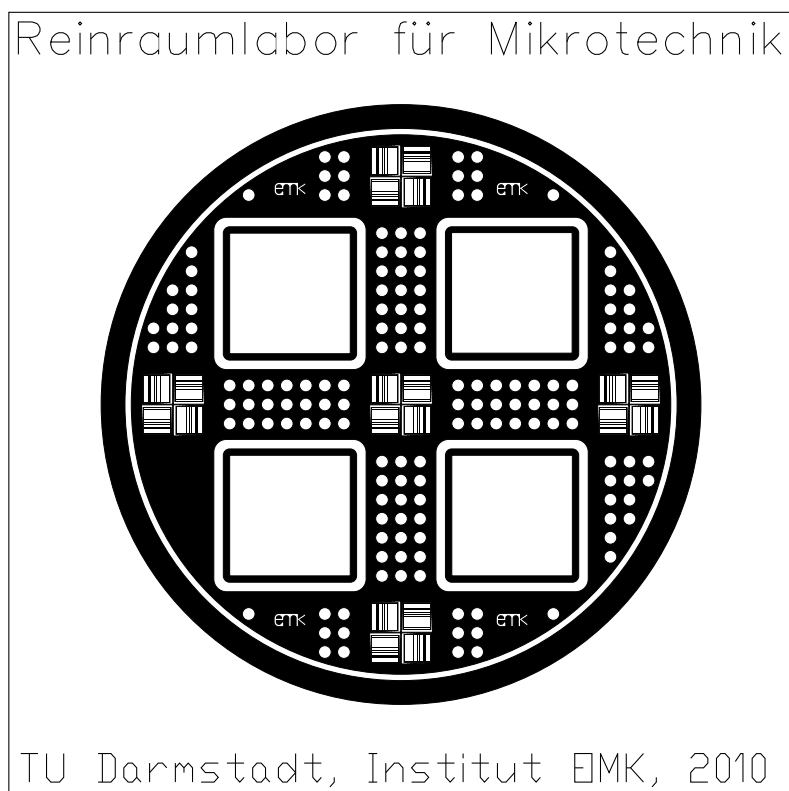


Abbildung D.11.: Spezifischer Widerstand 1/1: Proben

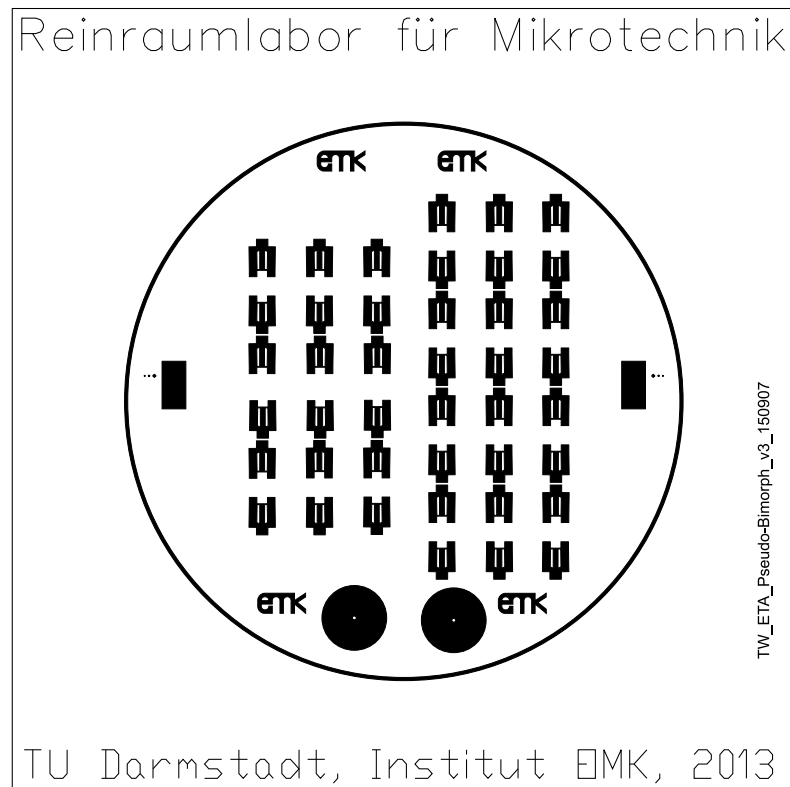


Abbildung D.12.: Mikroaktoren In-Plane 1/4: Opferschicht

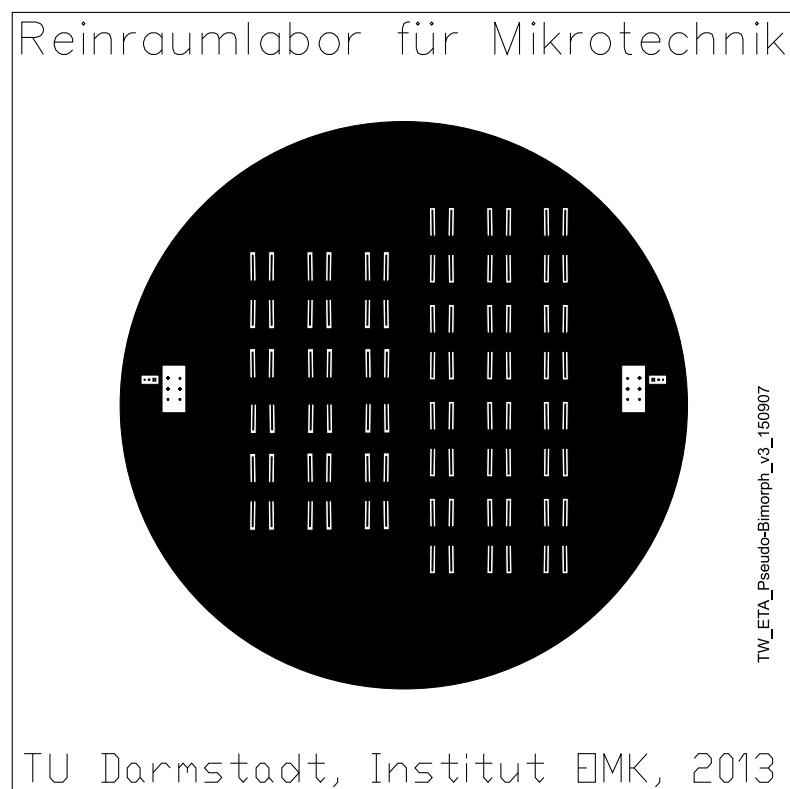


Abbildung D.13.: Mikroaktoren In-Plane 2/4: Heizerunterlage

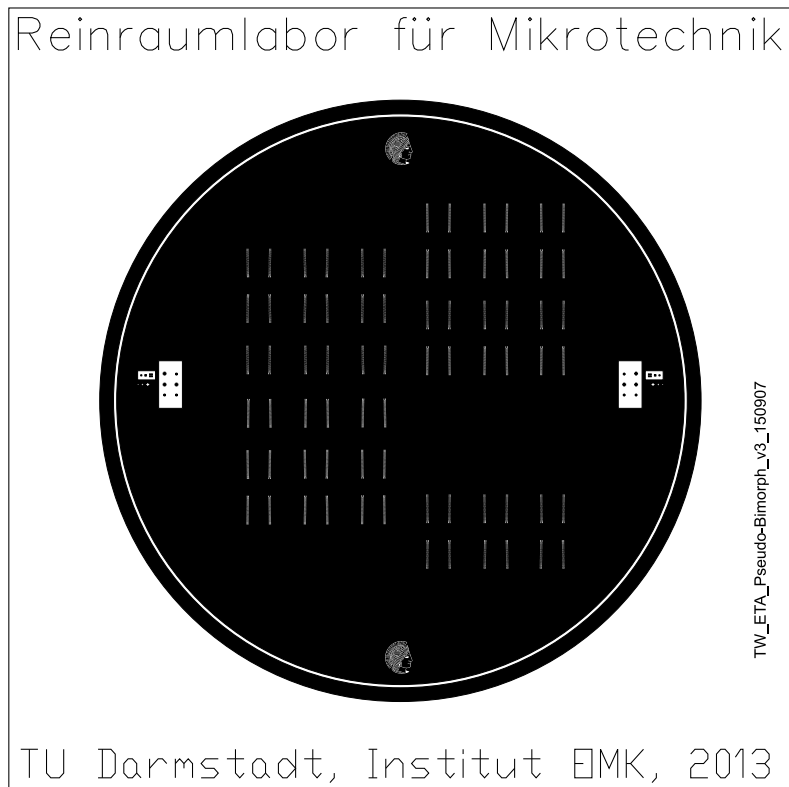


Abbildung D.14.: Mikroaktoren In-Plane 3/5: Heizer

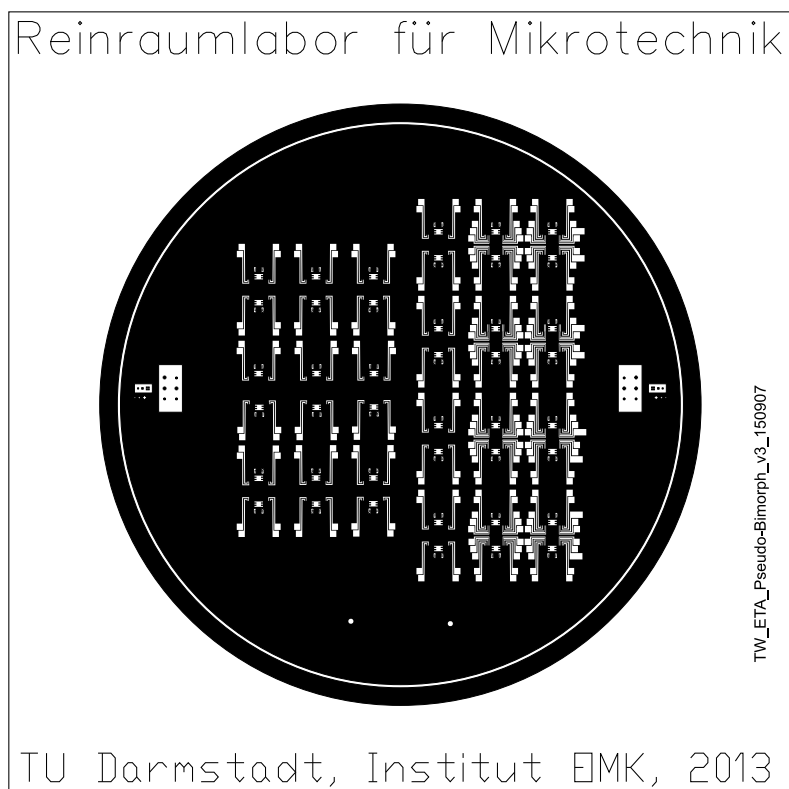


Abbildung D.15.: Mikroaktoren In-Plane 4/5: Leiterbahnen

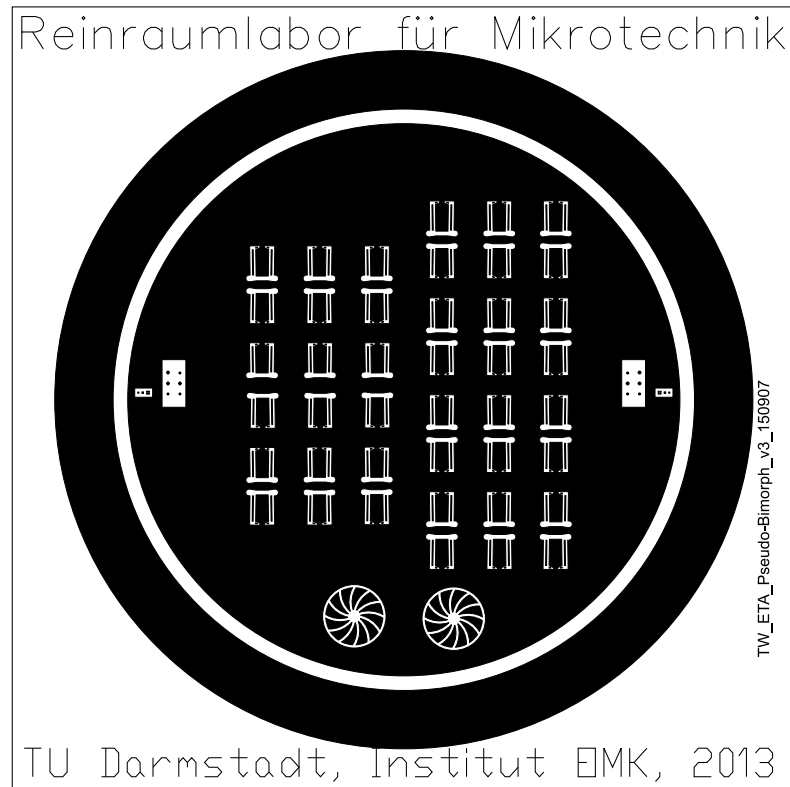


Abbildung D.16.: Mikroaktoren In-Plane 5/5: Dehnungskörper

Haptisches Display

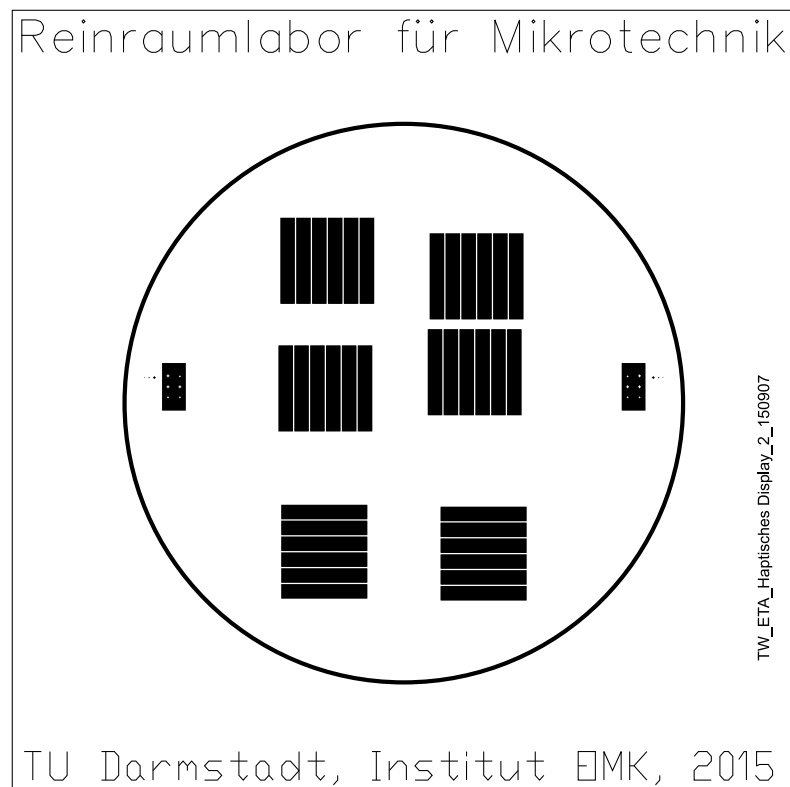


Abbildung D.17.: Haptisches Display 1/7: Opferschicht

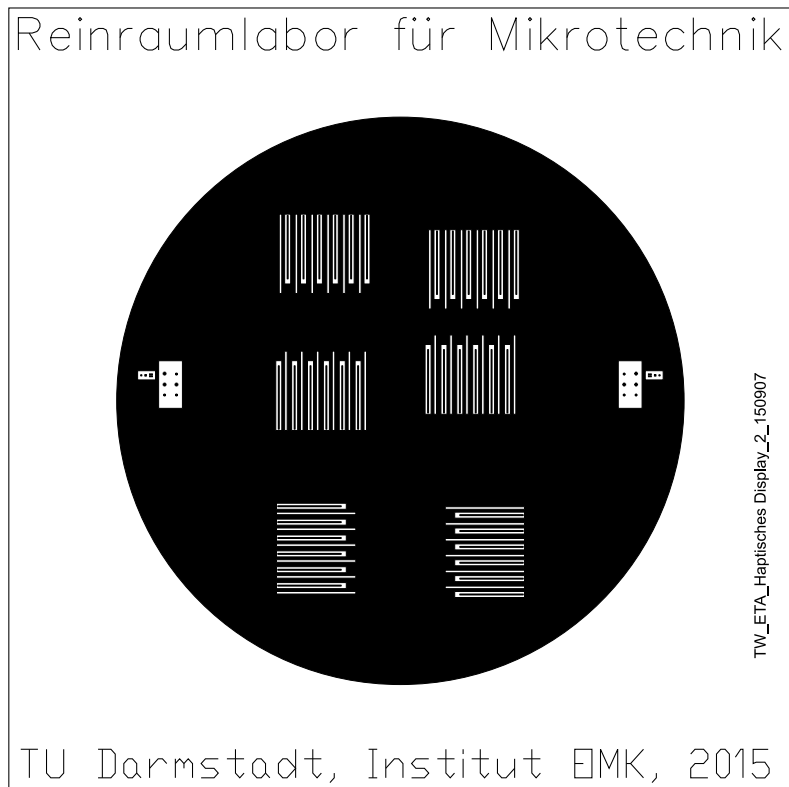


Abbildung D.18.: Haptisches Display 2/7: Heizerunterlage

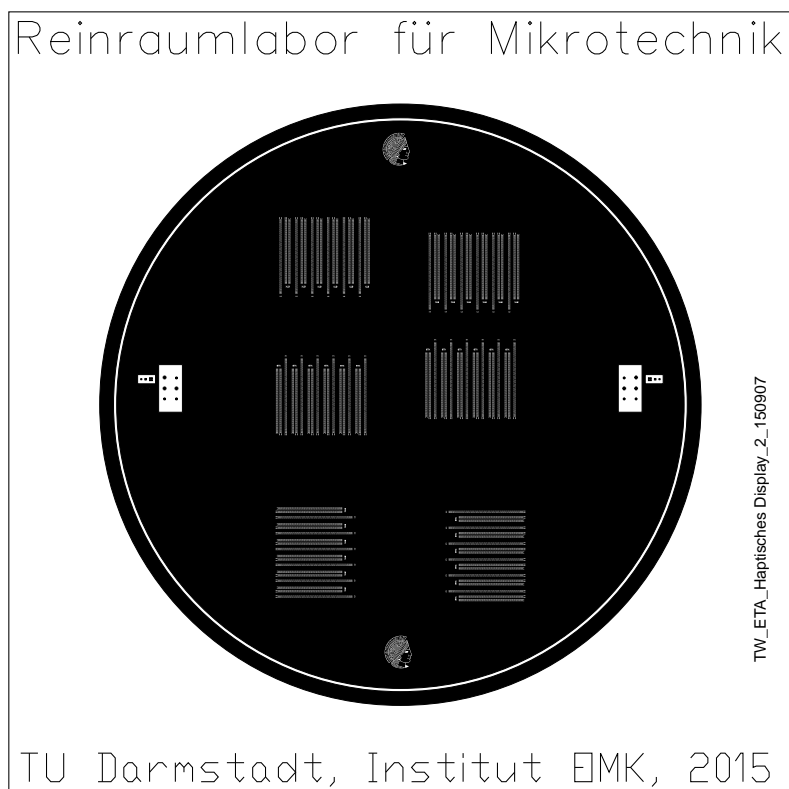


Abbildung D.19.: Haptisches Display 3/7: Heizer

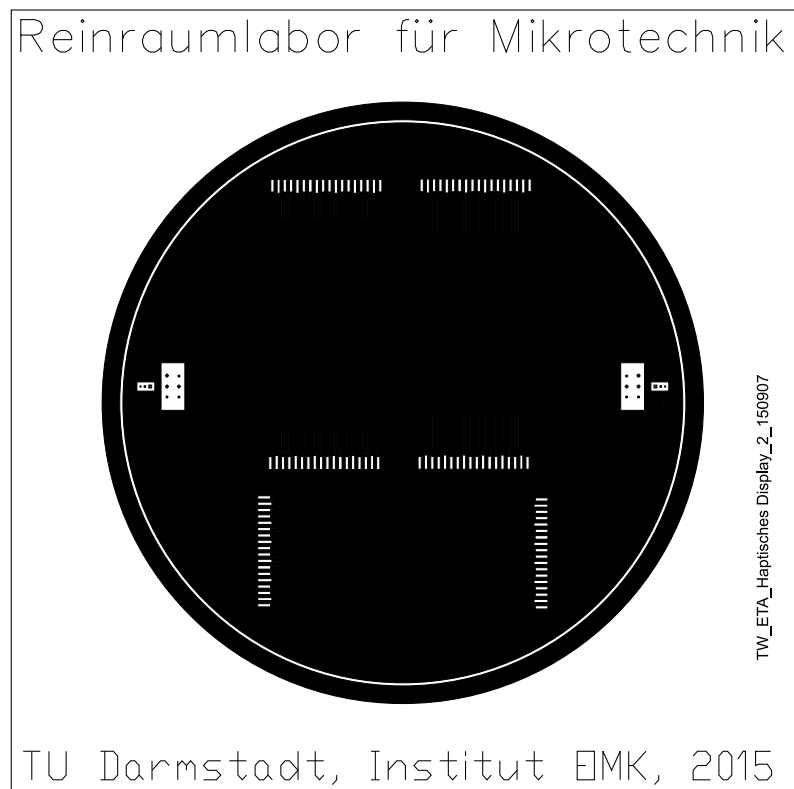


Abbildung D.20.: Haptisches Display 4/7: Leiterbahnen

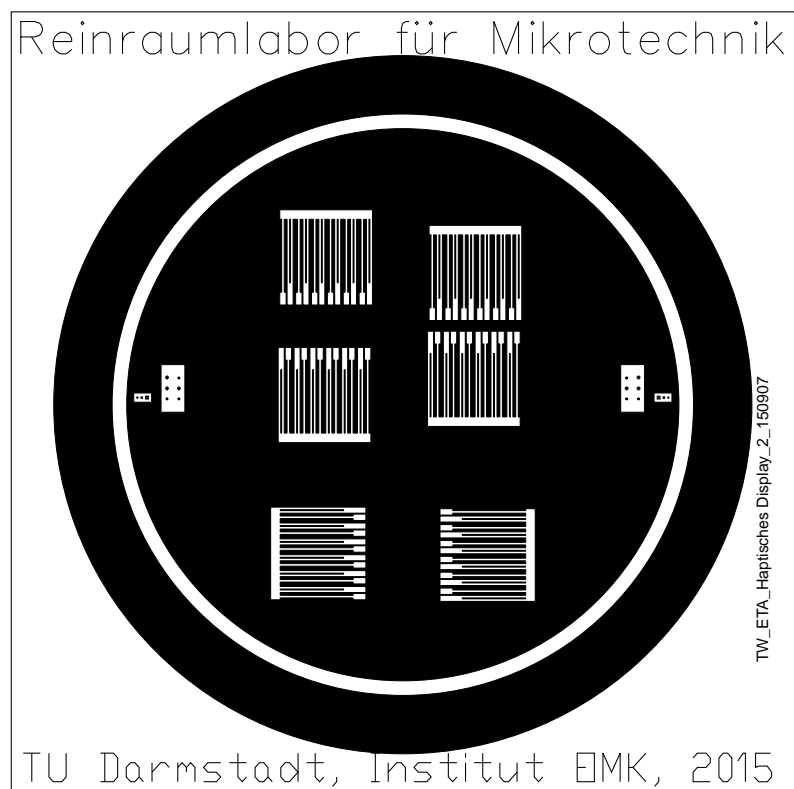


Abbildung D.21.: Haptisches Display 5/7: Dehnungskörper I

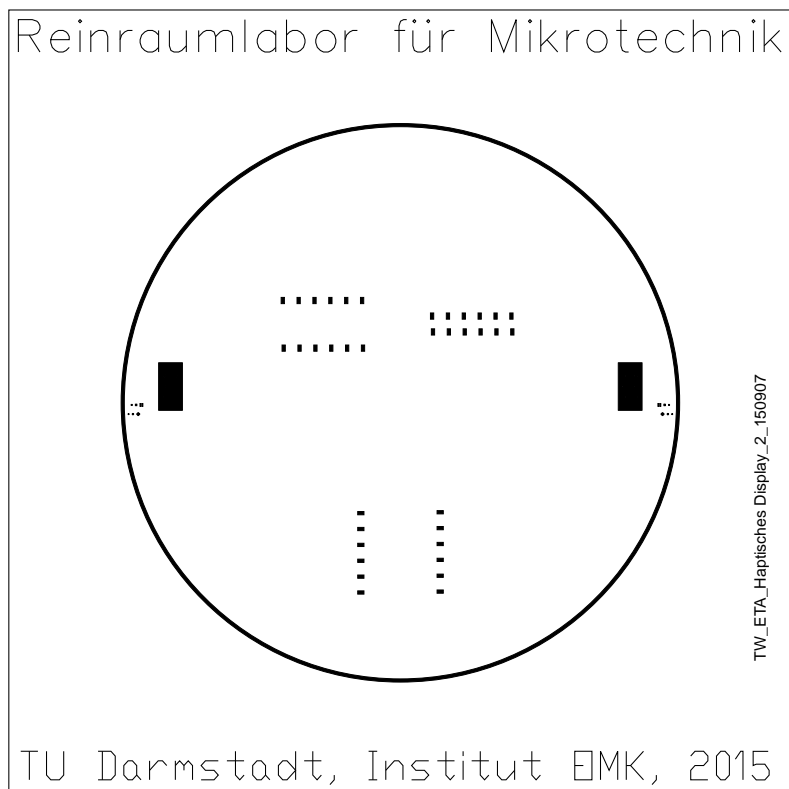


Abbildung D.22.: Haptisches Display 6/7: Verriegelung

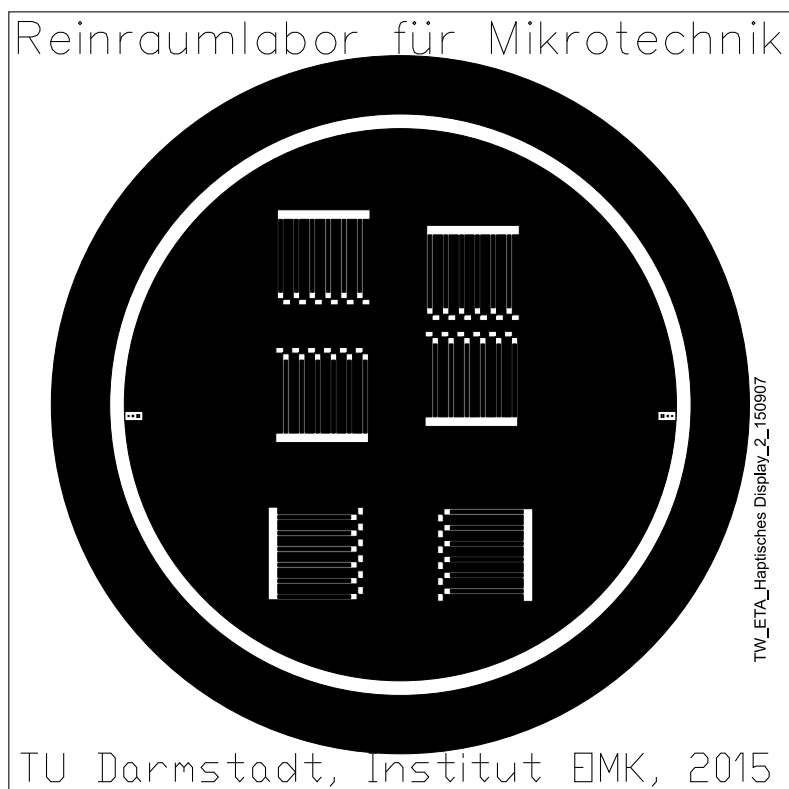


Abbildung D.23.: Haptisches Display 7/7: Dehnungskörper II

Werdegang

Thomas Winterstein

geboren am 12. November 1983 in Aschaffenburg,
ledig

Schulbildung

1990 – 1994	Pestalozzi-Grundschule, Aschaffenburg
1994 – 2003	Kronberg-Gymnasium, Aschaffenburg

Studium

2003 – 2010	Technische Universität Darmstadt, Elektrotechnik und Informationstechnik, Vertiefung Mikro- und Feinwerktechnik Abschluss: Diplom-Ingenieur
2007 – 2008	Norwegian University of Science and Technology (NTNU) in Trondheim, ERASMUS-Programm

Berufliche Tätigkeit

2010 – 2016	Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Technische Universität Darmstadt, Institut für Elektromechanische Konstruktionen, Fachgebiet Mikrotechnik und Elektromechanische Systeme
-------------	---

Praktika

2004 – 2005	<i>M-real Stockstadt GmbH</i> , Stockstadt
2008 – 2009	<i>Bosch Sensortec GmbH</i> , Reutlingen